TRAVAUX PRATIQUES DE PHYSIQUE
POUR TECHNICIENS SUPÉRIEURS CHIMISTES

Première année

TABLE DES MATIÈRES

T.P. 1 :	Mesures de longueurs et de masses	page 3
T.P. 2 :	Mesures de densités	page 6
T.P. 3 :	Mesures de résistances	page 10
T.P. 4 :	Mesure de la variation d'une résistance à l'aide d'un pont	page 17
T.P. 5 :	Mesures conductimétriques : étalonnage de la cellule	page 20
T.P. 6 :	Étude conductimétrique de deux électrolytes	page 27
T.P. 7 :	Étude de sondes résistives de température	page 31
T.P. 8 :	Étude d'un thermocouple	page 35
T.P. 9 :	Vérification de la loi de Boyle Mariotte	page 44
T.P. 10 :	Mesure du rendement d'un bec Hoffmann	page 47
T.P. 11 :	Mesures calorimétriques	page 51
T.P. 12 :	Tracé des isothermes d'un corps pur	page 74
T.P. 13 :	Pression de vapeur saturante	page 79
T.P. 14 :	Température et Pression dans une cocotte minute	page 86
T.P. 15 :	Étude d'une pompe à chaleur	page 89
T.P. 16 :	Étude du moteur de Stirling	page 100
T.P. 17 :	Mesure du coefficient γ de l'air par la méthode de Clément Désormes	page 104
T.P. 18 :	Mesure de γ par une méthode acoustique	page 109
T.P. 19 :	Mesure de tensions superficielles	page 112
T.P. 20 :	Étude d'un tensioactif	page 115
T.P. 21 :	Rapidité – Temps de réponse d'un capteur	page 120

DOCUMENT : Propriétés de l'eau à différentes températures page 124

ANNEXE 1 : Tables des coefficients de Student page 125

Notes personnelles page 126

Tous mes remerciements à Madame Locquin pour la relecture attentive qu'elle a apportée à cette édition.

TP N°1

MESURES DE LONGUEURS ET DE MASSES

Le but de cette première séance de travaux pratiques est triple :

- ☞ s'entraîner à utiliser des instruments de mesures usuels tels que des pieds à coulisse, des palmers et des balances de laboratoire ;
- ☞ rechercher si la précision d'une mesure est limitée par la résolution de l'instrument de mesure ou par des défauts de fidélité ;
- ☞ étudier la répercussion des incertitudes à l'aide de quelques applications.

1. Mesures de longueurs

1.1. Échantillon à étudier

- ☞ Choisissez un pavé droit ou parallélépipède rectangle
- ☞ Notez la nature de son matériau (aluminium, fer ou laiton).

Remarque : Vous prendrez soin de garder ce solide sur un coin de votre poste de travail car il sera utilisé pour des mesures ultérieures… même à la séance suivante.

1.2. Mesures à effectuer

a. Instruments

On utilise ici des pieds à coulisse au 1/10 de mm, 1/20 de mm, 1/50 de mm et un palmer au 1/100 de mm.

b. Mesures

Pour que les résultats présentent de l'intérêt, les mesures doivent être réalisées dans des conditions approchées. Il ne faut donc pas se contenter de dix lectures, mais il faut reposer le solide entre deux essais successifs et reprendre le processus de mesure au début dans chaque nouvel essai.

- ☞ Mesurez dix fois de suite une des dimensions (notée x_1) du solide choisi avec chacun des instruments dont on dispose.
- ☞ Mesurez les deux autres dimensions (notée x_2 et x_3) dix fois de suite avec le pied à coulisse au 1/50 de mm.
- ☞ Rassembler les résultats dans un tableau.

1.3. Évaluation des incertitudes sur les mesures

Observer chaque série de mesures.

- ☞ Pour chaque instrument, évaluer l'incertitude type de type B due à la résolution de l'appareil : $u_B(x_i) = \frac{\Delta}{\sqrt{12}}$
- ☞ Et, s'il y a lieu, l'incertitude type de type A due aux défauts de fidélité : $u_A(x_i) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$
- ☞ Évaluer l'incertitude combinée puis l'incertitude élargie au niveau de confiance 95% en utilisant le tableau de Student.
- ☞ Écrire le résultat final pour chaque mesure, avec le nombre de chiffres significatifs convenables.

Conclusion sur ce travail

En tenant compte

- ♦ d'une part la qualité des instruments que l'on a utilisé,
- ♦ d'autre part de l'aspect du solide étudié,

essayer de déterminer les causes probables des défauts de fidélité observés.

2. Mesures de masses

Nous utilisons deux balances électroniques mono plateau :

- l'une de portée 1 kg et de résolution 0,1 g;
- l'autre de portée de 100 g et de résolution 0,1 mg.

☞ Répéter plusieurs fois la pesée avec le pavé droit utilisé précédemment. Dresser un tableau des mesures par balance.

☞ Quelle conclusion pouvez-vous apporter pour chacune des deux balances ?

☞ Évaluer l'incertitude en précisant les types d'incertitudes à considérer dans chaque cas (A ou B, A et B).

☞ En déduire l'incertitude élargie au niveau de confiance 95%

☞ Dresser un tableau des résultats de la forme :

	m (g)	$u_{95\%}(m)$ (g)	$\frac{u_{95\%}(m)}{m}$	$\frac{u_{95\%}(m)}{m}\times 100\,\%$
Balance à 0.1 g				
Balance à 0,1 mg				

☞ Quels renseignements vous apporte ce tableau quant aux qualités des deux balances ?

3. Masse volumique de l'échantillon

☞ Calculer la masse volumique ρ de l'objet en indiquant clairement les résultats choisis pour effectuer ce calcul.

☞ Calculer l'incertitude sur ρ.

☞ Écrire le résultat avec le nombre de chiffres significatifs convenable.

TP N°2

MESURES DE DENSITÉS

1. Mesures de densités

1.1. Utilisation de densimètres : densité de solutions salines

Vous disposez d'une série de solutions de chlorure de sodium (NaCl) de concentrations c connues à 1% et d'une solution de concentration inconnue X.

a. Étude de la variation de la densité en fonction de la concentration

Pour chaque mesure :

- ☞ Introduire la solution dans une éprouvette suffisamment large et haute.
- ☞ Y plonger doucement un densimètre :
  - s'il s'enfonce complètement, la densité du liquide est inférieure à ce que le densimètre peut mesurer ;
  - s'il ne s'enfonce pas assez, la densité du liquide est trop grande pour l'appareil.
- ☞ Lorsque l'on a trouvé le densimètre le mieux adapté, veillez à ce qu'il ne colle pas à la paroi de l'éprouvette sous l'influence des forces de tension superficielle.
- ☞ Effectuer la lecture de la densité d et évaluer u(d) en tenant compte de la gène due au ménisque.
- ☞ Rincer et essuyer le densimètre avant de le ranger.
- ☞ Dresser un tableau des mesures faisant apparaître c, u(c), d et u(d).

b. Exploitation des résultats

- ☞ Tracer la courbe de la densité en fonction de la concentration $d = f(c)$ en choisissant les échelles telles que les incertitudes u(d) et u(c) soient environ représentées par la résolution du papier millimétré.
- ☞ En utilisant la méthode de régression linéaire, donner l'équation de la courbe obtenue et déterminer la concentration inconnue X ainsi que l'incertitude avec laquelle vous l'avez déterminée. Comment avez-vous estimé cette incertitude ?

1.2. Mesure de la densité par la méthode du flacon

a. Principe pour la densité d'un liquide

Le flacon utilisé s'appelle un pycnomètre. Il est constitué d'un petit ballon (d'environ 50 cm^3) sur lequel vient s'adapter un bouchon rôdé creux surmonté d'un tube capillaire et d'une ampoule de garde.

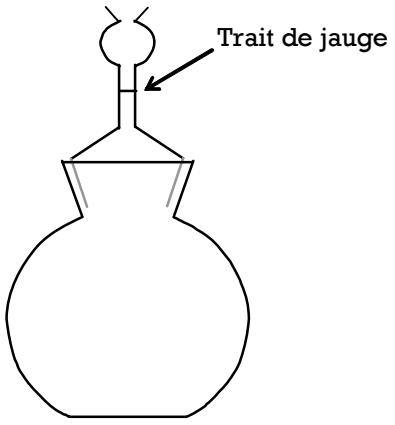


Figure 1 : Schéma du pycnomètre.

Sur une balance adaptée, on réalise les trois pesées suivantes :

① pycnomètre rempli de liquide jusqu'au trait de jauge : M_L

② pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge : M_e

③ pycnomètre vide et sec : M_v

La masse de liquide contenu dans le pycnomètre se déduit par différence : $m_L = M_L - M_v$

De même, nous pouvons exprimer la masse d'eau contenue dans le pycnomètre : $m_e = M_e - M_v$

L'expression de la densité du liquide est donc :

$$\boxed{d = \frac{m_L}{m_e} = \frac{M_L - M_v}{M_e - M_v}}$$

Remarque : Pourquoi est-il raisonnable de négliger la masse d'air contenue dans la pycnomètre à vide devant les masses des liquides ?

b. Principe pour la densité d'un solide

N.B. : Il faudra **peut-être** veiller à utiliser un pycnomètre à col large.

On réalise les trois pesées suivantes :

① pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge et le solide à côté : M_1

② pycnomètre contenant le solide et rempli d'eau jusqu'au trait de jauge : M_2

③ pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge : M_e

La masse du solide s'obtient par différence :

$$m_s = M_1 - M_e$$

La masse d'eau *occupant le même volume* s'exprime par :

$$m_e = M_1 - M_2$$

L'expression de la densité du solide est donc donnée par :

$$\boxed{d = \frac{m_s}{m_e} = \frac{M_1 - M_e}{M_1 - M_2}}$$

Remarque : Cette méthode ne peut évidemment pas être appliquée à des solides solubles dans l'eau ou moins dense que l'eau.

c. Manipulations

Précautions : Pendant toutes les opérations qui vont suivre, il ne faut pas tenir le pycnomètre à pleine main, ni le placer en plein soleil pour éviter de le chauffer. Les dilatations qui s'ensuivraient provoqueraient une erreur systématique. Les conditions de remplissage devront se faire dans les mêmes conditions de température.

Réalisation :

Effectuer les pesées pour déterminer :

- la densité de la solution saline de concentration *X* déjà utilisée.
- la densité d'un solide de votre choix (pensez à noter sa nature).

d. Résultats

Densité d'un liquide

- ☞ Effectuer le calcul et comparer la valeur trouvée avec celle obtenue avec par la méthode du densimètre.
- ☞ Exprimer littéralement puis calculer les incertitudes $u(m_L)$ et $u(m_e)$ en tenant compte, d'une part des pesées, d'autre part de l'ajustage du niveau au trait de jauge (le diamètre intérieur du capillaire et la hauteur d'ajustement sont de l'ordre du millimètre). Lequel de ces deux paramètres influence le plus et limite ces incertitudes ?
- ☞ En déduire $\frac{u(d)}{d}$ et $u(d)$.
- ☞ Que peut-on penser de *la* précision obtenue sur une densité par cette méthode ? Comparer avec la précision obtenue avec le densimètre.

Densité d'un solide

- ☞ Effectuer le calcul et *comparer la valeur trouvée avec des données issues de tables (Handbook) ou d'un site Internet.*
- ☞ *Calculer puis comparer la précision obtenue avec celle que l'on avait pour un liquide.*
- ☞ *Cette précision serait-elle la* même :
  - pour un matériau solide donné, quelle que soit la taille de l'échantillon utilisé pour la mesure ?
  - pour des échantillons de taille voisine quelle que soit leur nature ?

  Attention ces réponses devront être justifiées par des calculs !
- ☞ Sachant que les densités des solides usuels sont approximativement comprises entre 2 et 12, indiquer les limites entre lesquelles la précision de la mesure de *d* pourra être comprise.

TP N°3

Mesures de résistances

1. Etude préliminaire du lot de résistances fourni

Vous disposez de 5 résistances que l'on notera R_1, R_2, R_3, R_4 et R_5 de la plus faible jusqu'à la plus forte.

1.3. Utilisation d'un ohmmètre numérique

- ☞ En utilisant le multimètre sur la fonction ohmmètre, mesurer chacune des cinq résistances.
- ☞ En utilisant la notice du multimètre, calculer l'incertitude élargie d'un facteur 2 (95%) de chacune d'elle. Donner le résultat avec deux chiffres significatifs.
- ☞ Arrondir le résultat de chaque résistance en conséquence.
- ☞ Calculer l'incertitude relative pour chaque mesure.

Donner le tableau des résultats sous la forme suivante :

	Résistance 1	Résistance 2	Résistance 3	Résistance 4	Résistance 5
$R_i \pm u(R_i)$					
$\frac{u(R_i)}{R_i}$					

1.4. Valeur affichée par le constructeur[1]

- ☞ Trouver les valeurs indiquées par le constructeur à l'aide du code des couleurs (voir Document N°1 p 16).
- ☞ Mettre aussi les résultats sous la forme $R_i \pm u(R_i)$ dans un tableau en calculant l'incertitude due à la tolérance indiquée par le fabricant ($u_B(R_i) = \frac{t}{\sqrt{3}}$)

$R_i \pm u(R_i)$					

- ☞ Les valeurs mesurées sont-elles compatibles avec celles indiquées par le constructeur ?

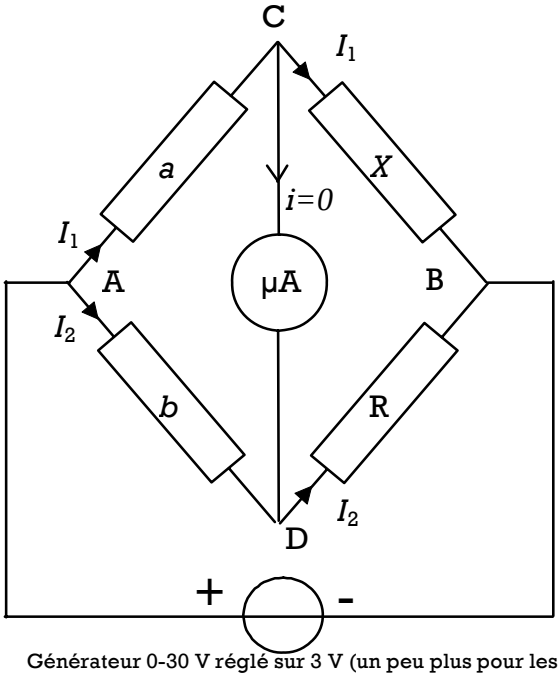
[1] En règle générale, la valeur d'une résistance est affichée par l'intermédiaire du *code des couleurs* qui se matérialise sur le composant par *quatre anneaux colorés*
Dans un lot de fabrication donné, le constructeur se donne une marge pour la valeur de la résistance : c'est *la tolérance* qui est exprimée en pourcentage de la valeur affichée.
Par exemple : $R = 570\ \Omega \pm 20\%$ de R
Il assure ainsi l'utilisateur, qu'au moment de la livraison, la résistance a une valeur comprise entre :
$456\ \Omega \leq R \leq 684\ \Omega$
Le niveau de confiance que l'on peut accorder à l'indication du constructeur s'améliore quand la tolérance diminue (et quand le prix du composant augmente !!!).

2. Pont de Wheatstone

Pont de mesure de résistances, ce montage présente :

- ♦ tous les inconvénients d'un « pont » : le montage est « lourd », la mesure est délicate ;
- ♦ mais heureusement tous les avantages : précision, etc.

2.1. Principe



- μA microampèremètre
- *a* et *b* résistances de rapport connu
- *R* résistance réglable connue
- *X* résistance à mesurer

Générateur 0-30 V réglé sur 3 V (un peu plus pour les grandes résistances)

En agissant sur les résistances *a*, *b* et *R*, il est possible d'annuler le courant dans le microampèremètre μA. On dit alors que le pont est équilibré.

On a :

$$V_C - V_D = 0 \quad \Rightarrow \quad V_C = V_D$$

Cela permet d'appliquer la loi d'Ohm aux bornes de *a* et de *b* :

$$V_A - V_C = a\, I_1 \qquad \text{et} \qquad V_A - V_D = a\, I_2$$

d'où :

$$a \cdot I_1 = b \cdot I_2 \Rightarrow \boxed{I_2 = \frac{a}{b} I_1}$$

D'autre part :

$$V_C - V_B = X \cdot I_1$$
$$V_D - V_B = R \cdot I_2$$

donc

$$X \cdot I_1 = R \cdot I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{X}{R} I_1$$

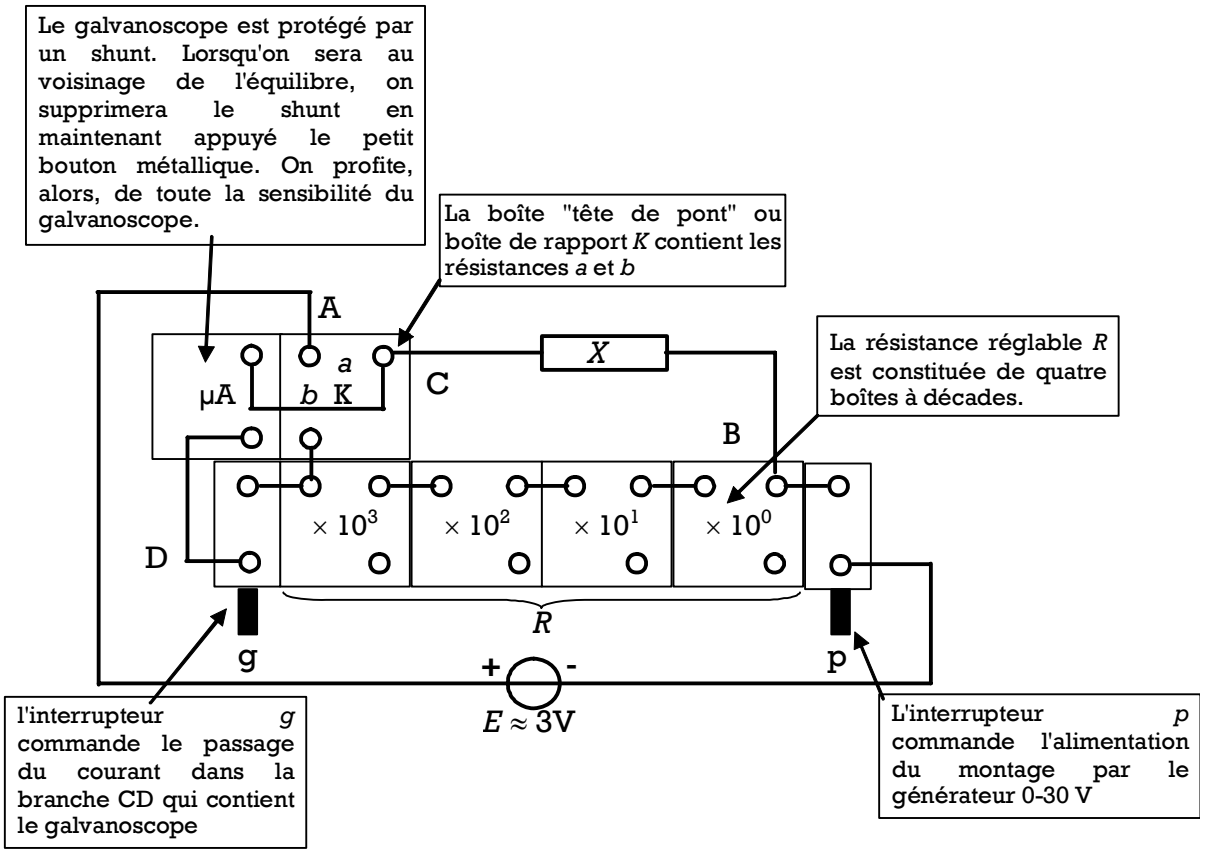
A l'équilibre du pont, les quatre résistances sont donc telles que :

$$\frac{X}{R} = \frac{a}{b} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{X = R \cdot \frac{a}{b}} \qquad (1)$$

Remarquons qu'il est inutile de connaître les résistances *a* et *b ;* seul leur rapport intervient. Ce rapport s'appelle *rapport de tête de pont*.

2.2. Montage

☞ Réaliser le montage suivant où ***X* représente la résistance R_i (i = 1 à 5)** dont on cherche à connaître la valeur.


Le galvanoscope est protégé par un shunt. Lorsqu'on sera au voisinage de l'équilibre, on supprimera le shunt en maintenant appuyé le petit bouton métallique. On profite, alors, de toute la sensibilité du galvanoscope.
La boîte "tête de pont" ou boîte de rapport K contient les résistances a et b
La résistance réglable R est constituée de quatre boîtes à décades.
A
a
μA
b K
C
X
B
× 10^3
× 10^2
× 10^1
× 10^0
D
R
g
p
+
-
E ≈ 3V
l'interrupteur g commande le passage du courant dans la branche CD qui contient le galvanoscope
L'interrupteur p commande l'alimentation du montage par le générateur 0-30 V

☞ Avant toute mesure, régler le zéro mécanique du microampèremètre.

2.3. Technique et mesures à effectuer

☞ Afficher $K = 1$ et mettre toutes les boîtes constituant R au maximum ($R > X$).

☞ Fermer l'interrupteur *p* (vers le haut) pour alimenter le montage. Toucher l'interrupteur *g* très brièvement (vers le bas) et noter le sens de déviation de l'aiguille du galvanoscope.

☞ Diminuer la valeur de R, en commençant par la boîte des milliers, jusqu'à ce que le sens de déviation du galvanoscope s'inverse. **Si cette condition n'est jamais réalisée, c'est qu'il y a un problème dans votre montage ; inutile de continuer sans y remédier.**

☞ Si la condition est réalisée, on a dépassé l'équilibre et $R < X$: il faut revenir d'un cran en arrière. Continuer à diminuer R en agissant sur la boîte des centaines, et ainsi de suite par approximations successives jusqu'à l'équilibre[2].

En vertu de la relation (1), on a alors : $X = R$

☞ Avant de passer à une autre résistance, traiter complètement le problème de l'incertitude de cette mesure.

Peut-on avoir plus de chiffres significatifs ? Essayer pour cela de mettre $K = 0{,}1$ et rechercher l'équilibre. On a alors : $X = K\,R$ et un chiffre significatif de plus. Essayer éventuellement $K = 0{,}01$ puis 0,001.

[2] Ne pas oublier d'appuyer sur le bouton de shunt du microampèremètre lorsque l'équilibre est très proche.

☞ **Incertitude type $u_s(X)$ due à la sensibilité du montage :** une fois l'équilibre trouvé, de combien faut-il faire varier R pour déceler une variation de déviation de l'aiguille du galvanoscope[3] ? Multiplier cette variation par K, et vous obtenez X_S, sensibilité du montage, que vous traitez comme une résolution d'appareil de mesure : $u_s(X) = \frac{X_S}{\sqrt{12}}$.

☞ **Incertitude type de justesse $u_j(X)$:** Elle est due la qualité de l'étalonnage des boîtes de résistances donnée par le fabricant: souvent 0,2%. Compte tenu du montage et des boîtes utilisées, nous avons ici : X_j = 0,3 % de X ; puis :

$$u_j(X) = \frac{X_j}{\sqrt{12}}$$

☞ **Incertitude combinée sur X :** Au niveau de confiance 95 %, on prendra :

$$u_c(X) = 2\sqrt{u_s(X)^2 + u_j(X)^2}$$

☞ Dresser le tableau récapitulatif suivant :

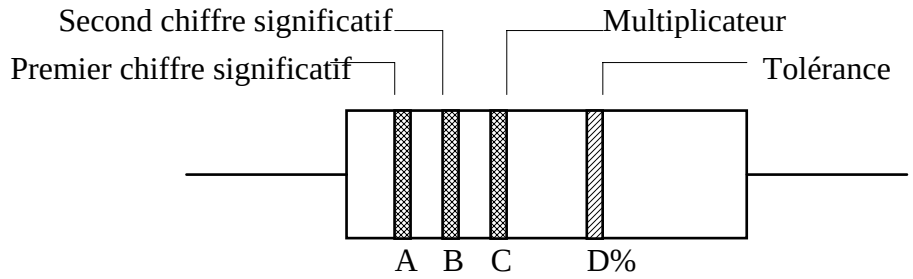
	Résistance 1	Résistance 2	Résistance 3	Résistance 4	Résistance 5
K					
R (Ω)					
X (Ω)					
$u_s(X)$ (Ω)					
$u_j(X)$ (Ω)					
$u_c(X)$ (Ω)					
$u_c(X)/X$					

☞ Commenter les résultats obtenus.
☞ Les comparer à ceux obtenus avec le multimètre.
☞ Conclure.

[3] C'est peut-être une unité de la dernière boîte mais c'est peut-être plus.

DOCUMENT N°1

LE MARQUAGE DES RESISTANCES



$$R = [(10 \times A) + B] \times 10^{C} \pm (D \times R/100)$$

Couleurs	Chiffres	Tolérances
Noir	0	1%
Brun	1	
Rouge	2	
Orange	3	
Jaune	4	
Vert	5	
Bleu	6	
Violet	7	
Gris	8	
Blanc	9	
Or	-1	5%
Argent	-2	10%
Néant		20%

Exemple

Soit un composant repéré par les couleurs suivantes : Vert, Violet, Jaune, Or.
Sa valeur sera :

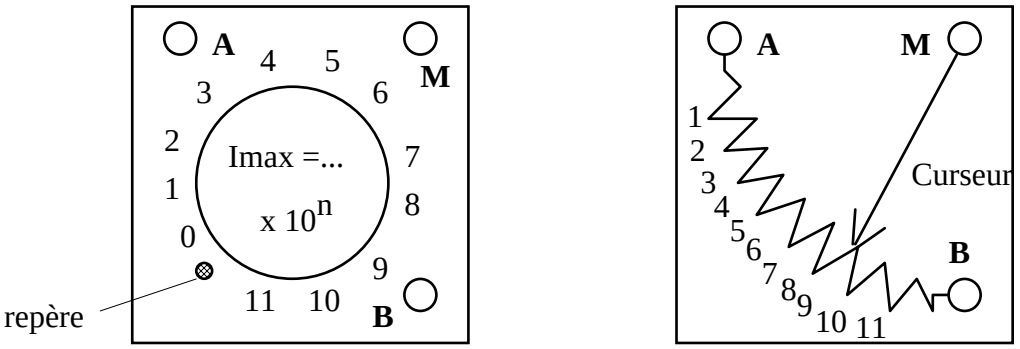
$$R = [(10 \times 5) + 7] \times 10^{4} = 570\,000\ \Omega = 570\ k\Omega$$

DOCUMENT N°2

LE MATERIEL A.O.I.P.

LES BOITES A DECADES

Vue extérieur (haut) Schéma de principe



- Les boîtes sont encastrables, de telle sorte qu'il soit possibles de réaliser des montages compacts.
- Si une boîte est utilisée entre les bornes A et M, elle permet de réaliser une résistance connue que l'on peut faire varier à volonté entre $0 \times 10^n\ \Omega$ et $11 \times 10^n\ \Omega$ (n est un nombre entier).
- Il existe toute une gamme de boîtes de n = -1 (ou $\times$ 0,1), n = 0 (ou $\times$ 1) jusqu'à n = 6 (ou $\times 10^6$).
- Sur chaque boîte est inscrit la valeur du courant maximal admissible sous peine de détérioration.
- La précision garantie par le constructeur est indiquée sur un côté de la boîte (0,2% ou 0,5% selon la valeur de n.
- Il faut toujours éviter de faire passer inutilement du courant entre deux mesures : les résistances s'échauffent et leur valeur peut légèrement varier.

Les boîtes ohms
D'aspect extérieur semblable, elles permettent d'obtenir antre A et M des résistances de 1 Ω, 10 Ω, 100 Ω, etc. sans valeurs intermédiaires.

BOITES TETE DE PONT OU BOITES DE RAPPORT

Elles sont utilisées dans le montage de certains ponts de mesure. L'indication qu'elles portent correspond au rapport des deux résistances *a* et *b* déterminées entre les bornes M et B d'une part, A et M d'autre part.

CLES DE CONTACT

- Levier à l'horizontal : circuit coupé, l'interrupteur est ouvert.
- Levier en position haute : circuit fermé.
- Levier en position basse : contact à impulsion.

CONNEXIONS

Elles peuvent être réalisées à l'aide de barrettes métalliques qu'il faut veiller à bien serrer. Il en existe de différentes tailles adaptées à tous les types de montages.

TP N°4

Mesure de la variation d'une résistance à l'aide d'un pont

1. Le pont de Wheatstone déséquilibré

1.1. Intérêt du pont de Wheatstone

Un tel montage peut apparaître démodé quand on sait qu'il existe aujourd'hui d'excellents multimètres numériques permettant la mesure de résistances avec une bonne précision.

Cependant, le pont de Wheatstone n'est pas prêt de disparaître :

- ☞ d'une part, en mesure industrielle, le repérage des températures est, dans bien des cas, pratiqué à l'aide de "sondes de température à résistance" (cf. T.P. N° 7) et la mesure est parfois faite au moyen d'un montage en pont de Wheatstone. La mesure de pressions ou de forces à l'aide de jauges piézo-résistives utilise aussi ce type de montage.
- ☞ d'autre part, de nombreux appareils utilisent un pont de Wheatstone au niveau de leur système de détection : c'était le cas des anciens chromatographes en phase gazeuse.

Le principe de ces mesures est simple : quatre résistances sont montées en pont. Deux d'entre elles jouent le rôle de *a* et de *b* ; une troisième joue le rôle d'élément de référence du système de mesure ou de détection. La quatrième, identique à la troisième (soit par sa nature, soit par sa valeur) va servir d'élément sensible ou capteur du système de mesure.

Initialement, on règle le pont de telle sorte qu'il soit à l'équilibre : le courant dans la branche CD est nul.

Lorsque le phénomène à détecter se produit, il provoque une variation de la valeur de la quatrième résistance : le pont est brusquement déséquilibré et un courant *i* circule entre C et D.

Ce courant *i* de **déséquilibre** du pont :

- ☞ sert donc à détecter l'événement qui a provoqué la variation de la résistance jouant le rôle de capteur ;
- ☞ peut aussi servir à mesurer la perturbation qui lui a donné naissance.

1.2. Simulation d'une détection de température

Pour bien, comprendre cette utilisation particulière et importante du pont de Wheatstone, nous allons ***simuler*** ce qui se passe lorsque l'on cherche à repérer une température à l'aide d'une sonde à résistance Pt 100. Il s'agit d'une résistance de platine telle qu'à 0°C sa résistance $R_0 = 100\ \Omega$.

Portée à des températures supérieures à 0°C, sa résistance augmente.

Si le pont a été réglé à l'équilibre alors que la sonde était à 0°C, il va progressivement se déséquilibrer au fur et à mesure que la température de la sonde s'élève.

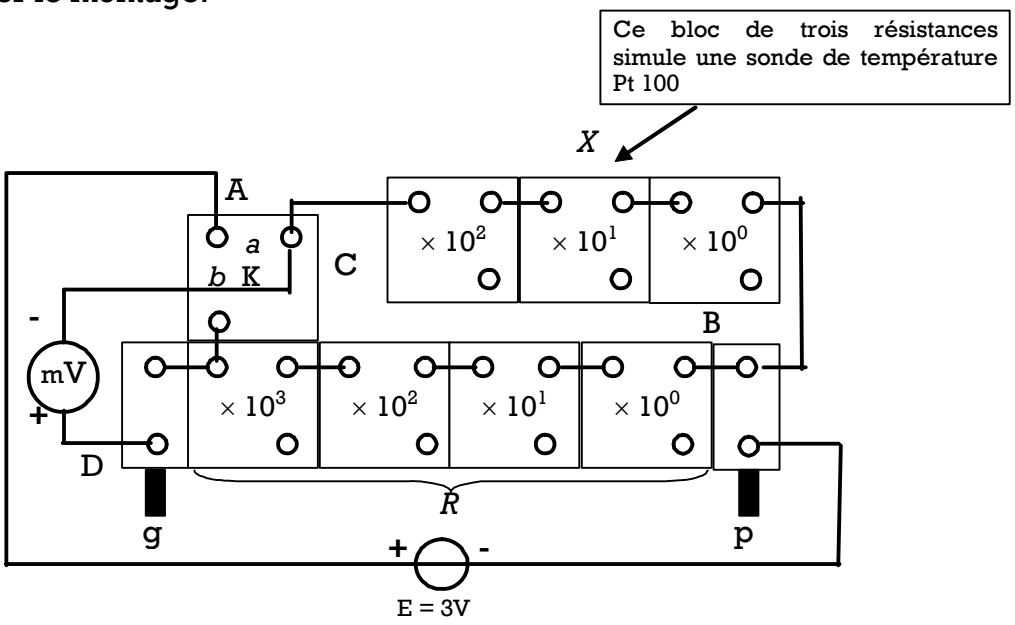
1.3. Montage

Dans le montage ci-dessous, la résistance *X,* constituée par un ensemble de trois boîtes à décades, ***simule*** une sonde Pt 100. On fera varier, manuellement, la valeur de la résistance entre 100 et 140 Ω afin de simuler une variation de température de 0 à 100°C.

Sur le schéma de montage ci-dessous, **mV** représente un multimètre numérique utilisé sur la fonction millivoltmètre dont le rôle est de ***mesurer la tension de déséquilibre du pont*** **(**proportionnelle au courant de déséquilibre).

- ☞ Avant de réaliser le montage, mesurer les résistances *a* et *b* de la boîte de tête de pont réglée sur $K = 1$, à l'aide d'un ohmmètre.

☞ Réaliser le montage.



1.4. Réglage de l'équilibre du pont

☞ Afficher X = 100 Ω et K = 1.

☞ Fermer les interrupteurs p et g.

☞ Rechercher l'équilibre du pont en faisant varier R[4].

☞ Une fois cet équilibre atteint, vous ne modifierez plus la valeur affichée de la résistance R.

1.5. Étude de la tension de déséquilibre du pont

☞ Mettre le multimètre sur la fonction millivoltmètre pour mesurer la tension de déséquilibre du pont.

☞ On fait varier la résistance X, en la notant $X_0 + \Delta X$, de 100 à 200 Ω :
de 1 Ω en 1 Ω de 100 à 105 Ω
puis de 5 ohms en 5 ohms de 105 à 200 Ω.

☞ Dresser un tableau des résultats.

☞ Tracer la courbe $U_{CD} = f(\Delta X)$ où U_{CD} représente la tension de déséquilibre.

☞ Montrer que cette courbe possède une partie linéaire modélisable par $U_{CD} = \alpha\, \Delta X$. Préciser dans quel intervalle et trouver son équation.

1.6. Étude théorique

On pose $a = b = R_0$.

☞ Montrer que la tension de déséquilibre du pont peut se mettre sous la forme :

$$U_{CD} = \frac{E \cdot R_0 \cdot \Delta X}{(R_0 + X_0)(R_0 + X_0 + \Delta X)}$$

☞ Montrer que si ΔX est négligeable devant R_0, U_{CD} est proportionnelle à ΔX.

☞ Vérifier que cette condition (ΔX négligeable devant R_0) est bien réalisée dans la partie linéaire de la courbe expérimentale.

[4] Si les boîtes étaient parfaitement étalonnées, on devrait trouver R = 100 Ω. Il est sûrement possible que R s'écarte **légèrement** de cette valeur.

TP N°5

Mesures conductimétriques : étalonnages de la cellule

1. Principe d'une mesure conductimétrique

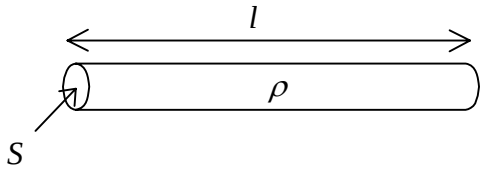
Sont conducteurs du courant électrique non seulement les métaux (les porteurs de charges sont alors uniquement des électrons) et les semis conducteurs (les porteurs de charges sont de deux types : électrons et "trous" positifs), mais aussi certains milieux liquides que l'on appelle des **solutions électrolytes**. Les porteurs de charges sont des anions négatifs et des cations positifs.

Cas d'un métal

Pour un métal, la résistance est donné par la relation :

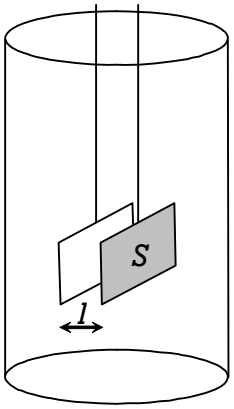
$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

où l est la longueur du conducteur,
S sa section droite
ρ la résistivité du métal.



Cette résistivité ρ dépend de la nature du métal et, pour un métal donné, de la température.

Cas d'un électrolyte



Pour une solution électrolytique, on peut reprendre la même relation à condition de plonger dans le liquide une "***cellule conductimétrique***" constituée par deux électrodes de platine platiné (recouvertes de platine pulvérulent) planes, parallèles l'une à l'autre, assujetties par un support à distance fixe l'une de l'autre.

La longueur l de la solution conductrice correspond à la distance entre les électrodes et la section S à la surface en regard des deux électrodes.

La résistivité ρ dépend :

- de la nature des espèces ioniques présentes dans le milieu,
- de leurs concentrations,
- de la température.

On pourra effectuer la mesure de la résistance R du volume de solution compris entre les électrodes. Si les caractéristiques de la cellule (l et S ou mieux leur rapport k_c) sont connues, on en déduira alors la résistivité de la solution.

En fait, en chimie, on préfère souvent parler de la conductivité γ qu'il est facile de calculer à partir de la résistivité :

$$\boxed{\gamma = \frac{1}{\rho}}$$

Cette conductivité γ étant liée à la composition de la solution, on peut envisager différentes applications :

- méthodes d'étude du comportement des électrolytes,
- dosages conductimétriques,
- détermination de différentes constantes d'équilibres ioniques (K_a, K_s...),
- étude de la cinétique de certaines réactions.

A priori, on pourrait penser que la mesure d'une résistance de solution électrolyte peut se faire par n'importe laquelle des méthodes précédemment étudiées.

En fait, il faut se placer impérativement dans des conditions qui empêchent tout risque d'électrolyse ; ce qui modifierait la nature de la solution et qui ferait perdre toute signification à la mesure.

Pour ces mesures particulières de résistances, on utilise deux types de "conductimètres" :

- les uns, les plus répandus, sont en fait des ohmmètres conçus de façon à ce que la courant parcourant le volume de solution soit parfaitement négligeable. Ils portent généralement des échelles graduées en ohms et des échelles graduées en siemens, donnant directement la conductance G :

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{s}{l} = \gamma \cdot \frac{s}{l} = \gamma \cdot k_c \qquad \text{où} \qquad k_c \text{ est la constante de cellule}$$

- les autres correspondent à un montage de pont de Wheatstone alimenté en alternatif sous des fréquences suffisamment élevées (de 100 à 2000 Hz). Ainsi, les ions sont sollicités par le champ électrique alternatif en sens inverse deux fois par période (0,5 ms $\leq T \leq$ 10 ms) et leur mouvement résultant est nul : ils n'atteignent pas les électrodes et aucune électrolyse ne peut se produire.

Ainsi modifié le montage porte le nom de "***pont de Kohlrausch***". Du fait de son inertie, l'instrument de zéro ne peut plus être le galvanoscope : le cadre resterait immobile indépendamment du courant qui le traverse. Comme les fréquences utilisées sont dans le domaine audible, on peut utiliser un écouteur comme détecteur de zéro. On peut également utiliser un oscilloscope entre C et D : lorsque l'équilibre du pont est atteint, la tension U_{CD} est nulle et la trace observée sur l'écran cesse d'être une sinusoïde pour d'identifier à l'axe horizontal.

Conclusion : Vous ne perdrez pas de vue que les mesures conductimétriques sont de fait des mesures de résistances (ou de conductances) pour lesquelles on mesure la résistance (ou la conductance) de l'échantillon de solution compris entre les deux armatures d'une cellule conductimétrique.

2. Précautions d'emploi des cellules conductimétriques

- La cellule ne doit jamais sécher : prévoir un récipient contenant de l'eau distillée où la cellule sera plongée lorsqu'on ne l'utilise pas.
- Ne jamais toucher les électrodes : pour nettoyer la cellule, un simple rinçage avec un jet de pissette suffit, suivi d'un essuyage extérieur.
- Lorsque, dans les calculs, la constante k_c de la cellule intervient, il est prudent de la mesurer plutôt que de se fier à l'indication gravée par le constructeur. En effet, une utilisation maladroite de la cellule a pu modifier ses caractéristiques géométriques et, par conséquent, la valeur de k_c. La valeur indiquée par le constructeur est généralement exprimée avec le centimètre pour unité de longueur et peut constituer un ordre de grandeur à prendre en compte.

3. Conductivité de la solution étalon en fonction de la température

☞ Placez dans un petit Becher un peu de solution de chlorure de potassium K^+,Cl^- à la concentration c = 0,02 mol.dm^{-3}.

☞ Relevez la température de la solution et l'incertitude associée.

☞ Vous chercherez dans le tableau ci-dessous la conductivité γ de la solution étalon (au besoin, interpoler linéairement entre deux valeurs) :

θ (°C)	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
γ (S.m^{-1})	0,2193	0,2243	0,2294	0,2345	0,2397	0,2449	0,2501	0,2553	0,2606	0,2659

☞ L'incertitude sur la température induit une incertitude sur la conductivité : calculez là !

4. Mesures de la constante k_c d'une cellule conductimétrique

Ce TP se propose de **comparer deux méthodes expérimentales**, pour mesurer la valeur de cette constante.

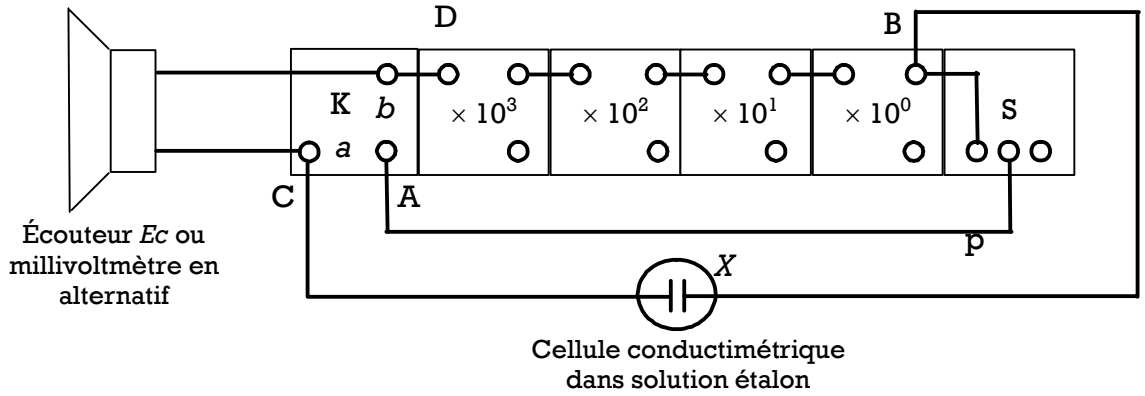
- Le **pont de Kohlrausch** qui s'apparente au pont de Wheatstone dans son principe général.
- Le **conductimètre**, pour lequel il faudra toujours garder à l'esprit qu'il s'agit d'un appareil de mesure électrique.

Vous manipulerez en recherchant toujours les causes d'erreurs et les incertitudes.

4.1. Utilisation d'un pont de Kohlrausch

C'est un pont de Wheatstone alimenté en alternatif où la solution contenue entre les électrodes constitue la résistance à mesurer.

a. Montage



▫ *S* source alternative utilisée sur la sortie 2000 Ω

▫ *Ec* écouteurs : le ***minimum*** de son traduit le minimum de courant dans la branche CD, donc l'équilibre du pont.

▫ *K* boîte tête de pont ou boîte de rapport sur laquelle on affiche le rapport des résistances *a* et *b*.

▫ La résistance variable *R* est constituée par une série de boîtes à décades.

▫ *X* représente la résistance de la portion d'électrolyte comprise entre les électrodes de la cellule conductimétrique.

b. Technique d'une mesure

☞ Plonger la cellule dans la solution étalon en veillant à ce qu'aucune bulle d'air ne se trouve entre les électrodes.

☞ Arrêter l'agitation de la solution pendant le temps de la mesure.

☞ Mettre les boîtes à décades constituant *R* à leur valeur maximum et la boîte de rapport sur 1.

☞ Appuyer sur l'interrupteur du vibreur *S* pour alimenter le montage. L'oreille est un bon détecteur, mais elle se fatigue vite ! Vous obtiendrez de meilleurs résultats en manipulant rapidement et en coupant l'alimentation de la source sonore ; ce qui évitera également une usure de la pile qui l'alimente.

☞ Diminuer progressivement la valeur de *R* en agissant d'abord sur la boîte de valeur la plus forte. Le son émis par les écouteurs doit diminuer. Quand il augmente de nouveau, reculer d'un cran la valeur de la boîte et passer à la boîte de rang inférieur. On cherchera ainsi à obtenir de proche en proche le minimum d'intensité sonore dans les écouteurs.
Quand ce minimum est atteint, nous obtenons :

$$X = \frac{a}{b} \cdot R \qquad \text{avec} \qquad \frac{a}{b} = K$$

☞ Si la lecture de R ne donne qu'un ou deux chiffres, affiner le résultat, en recommençant la mesure, en prenant un rapport K plus faible (0,1 ou 0,01).

☞ Apprécier l'incertitude due à la sensibilité du système de mesure $u_S(X)$.

c. Exploitation de la mesure au calcul de la constante de cellule

☞ Calculer la constante k_c de la cellule :

$$k_c = \frac{l}{s} = \frac{\gamma}{G} = R \cdot \gamma \qquad \text{en cm}^{-1} \text{ ou m}^{-1}$$

☞ Rappeler l'incertitude de sensibilité $u_S(X)$.

☞ Noter aussi la précision garantie par le constructeur sur les boîtes et en déduire l'incertitude de justesse $u_j(X)$.

☞ Combiner ces deux incertitudes pour obtenir l'incertitude sur X.

☞ Conclure en donnant la valeur de X à retenir sous la forme $X \pm u(X)$.

4.2. Utilisation du conductimètre Tacussel CDM 210

Vous veillerez à utiliser cet appareil conformément à la notice du constructeur.

Vous y rechercherez l'incertitude de mesure.

a. Mode d'emploi de l'appareil

① Allumez l'appareil (bouton rouge sur la face arrière)et attendre au moins trois secondes

② Appuyez sur *MODE* : Sélection de la grandeur conductivité γ ou résistivité ρ en appuyant sur ⌫ ou sur ⌦

Appuyez sur ☑ : Sélection de la gamme *AUTO* en appuyant sur ⌫ ou sur ⌦

Appuyez de nouveau sur ☑ :Sélection de l'unité (S/m) en appuyant sur ⌫ ou sur ⌦

Appuyez encore sur ☑ : Sélection de AUTOREAD en appuyant sur ⌫ ou sur ⌦

③ Appuyer sur CELL : la valeur d'un précédent étalonnage s'affiche.

Appuyez de nouveau sur *CELL* : Plonger la cellule dans la solution étalon (si ce n'est déjà fait !)

Appuyez sur ☑ : A l'aide des touches ⌫ et ⌦ , ajuster la valeur de γ **<u>C'est celle indiquée sur la première ligne de l'afficheur !</u>**. Quand l'indication *STAB* apparaît, lire la constante de cellule <*CTE CELLULE*> en cm^{-1}.

④ Par la suite, pour obtenir une mesure, il suffit d'appuyer sur *SAMPLE* et d'attendre la stabilisation *STAB*.

b. Valeur obtenue et comparaison des deux méthodes

☞ Suivez le mode d'emploi ci-dessus pour relever la valeur affichée par le conductimètre. Évaluez son incertitude.

☞ Comparez-la à celle trouvée avec le pont de Kohlrausch. Y a-t-il une méthode plus juste que l'autre ?

Durant la suite du TP,
vous utiliserez le conductimètre avec la cellule étalonnée.

5. Contrôle de la pureté d'une eau

5.1. Eau de ville

☞ Mesurez sa conductivité.

☞ Appréciez l'incertitude sur cette mesure (**utilisation de la notice**).

Conséquences pratiques

☞ A partir des résultats obtenus, envisager les conséquences pratiques sur les :
- précautions lors de la manipulation de circuits électriques sous tension ;
- interventions sur des feux d'origine électrique ;
- tests de contrôle de la pureté d'une eau.

5.2. Eau permutée du laboratoire

☞ Mesurez sa conductivité en opérant le plus rapidement possible entre le remplissage du Becher au robinet et la mesure.

☞ Appréciez l'incertitude sur cette mesure.

a. Modèle de conductivité d'une eau théoriquement pure

L'eau est le siège d'une réaction d'auto ionisation :

$$H_2O + H_2O = H_3O^+ + HO^- \text{ avec } K_e = \left[H_3O^+\right]\left[OH^-\right] = h \cdot \omega$$

où $K_e = h^2$ (soit $pK_e = 2$ pH) dans l'eau rigoureusement pure.

La mesure de la conductivité de l'eau permettra d'accéder à une valeur de h.

En effet :

$$\gamma = \sum C_i \cdot \lambda_i \cdot z_i \qquad \text{avec } C_i \text{ en mol.m}^{-3}$$

$$\Rightarrow \quad \gamma = 10^3 \times h \cdot (\lambda^\circ_{H_3O^+} + \lambda^\circ_{OH^-})$$

$$\Rightarrow \quad h = \frac{\gamma}{10^3(\lambda^\circ_{H_3O^+} + \lambda^\circ_{OH^-})}$$

Données numériques

θ	$\lambda^0_{H_3O^+}$	$\lambda^0_{HO^-}$	γ	h	K_e	pK_e
(°C)	($S.m^2.mol^{-1}$)	($S.m^2.mol^{-1}$)	($S.m^{-1}$)	(mol/L)		
18	315.10^{-4}	174.10^{-4}	4.10^{-6}	$0{,}818.10^{-7}$	$6{,}69.10^{-15}$	14,17
20	350.10^{-4}	198.10^{-4}	$5{,}5.10^{-6}$	10^{-7}	10^{-14}	14

☞ La valeur de γ que vous avez mesuré vous permet-elle d'affirmer que l'eau permutée du laboratoire est pure ?

☞ Calculer la concentration h et en déduire le pH.

☞ Conclure sur la validité de ce modèle.

b. Modèle de l'eau carbonatée

En fait, l'eau permutée du laboratoire n'a pas été préparée, ni conservée à l'abri de l'air. Il s'établit un équilibre avec le dioxyde de carbone présent dans l'air :

$$CO_{2\,(g)} \leftrightarrow CO_{2\,(aq)}$$

et dans l'eau :

$$CO_{2\,(aq)} + H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + HCO_3^- \qquad K_a = 10^{-6,4}$$

dans cette solution saturée en dioxyde de carbone, on a donc :

$$[H_3O^+] = [HCO_3^-] = h$$

et la conductivité doit être de la forme :

$$\gamma = 10^3 \times h \cdot (\lambda^\circ_{HCO_3^-} + \lambda^\circ_{H_3O^+}) \quad \text{avec} \quad \lambda^\circ_{HCO_3^-} = 44{,}5 \times 10^{-4}\ \text{S.m}^2\text{.mol}^{-1}$$

☞ A partir de la valeur mesurée de la conductivité, calculez h en utilisant la relation ci-dessus. En déduire le pH de l'eau permutée du laboratoire.

☞ Utiliser les données ci-dessus pour calculer la concentration de dioxyde de carbone dissous dans l'eau.

☞ Conclure sur la validité de ce modèle.

Vous veillerez à exprimer convenablement les différents résultats.

5.3. Exemple d'application industrielle

Une installation de déminéralisation d'eau destinée à la production d'eau "pure" peut-être entièrement automatisée. Une sonde conductimétrique surveille la conductivité de l'eau à la sortie des colonnes. L'eau pure, très pauvre en ions, est très peu conductrice.

Dès que la conductivité atteint un certain seuil haut, c'est le signe que les résines échangeuses d'ions ont perdu de leur efficacité et laissent passer des ions étrangers à l'eau.

La comparaison entre la valeur du signal de mesure et le seuil adopté entraîne , dès qu'il y a égalité, la fermeture des vannes d'alimentation en eau brute et la mise en route d'un cycle de régénération des résines.

C'est encore la comparaison entre le signal de mesure et la valeur seuil qui entraînera l'arrêt des opérations de rinçage des résines dès que le signal se sera abaissé jusqu'à un niveau seuil bas.

La plupart des installations comportent deux unités en parallèle, la seconde étant mise en service pendant le cycle de régénération de la première. On assure ainsi une production en continu.

TP N°6

Étude conductimétrique de deux électrolytes

1. Étude des propriétés d'un électrolyte fort

On étudie une série de solutions de bromate de potassium (K^+, BrO_3^-).

1.1. Préparation d'une série de solutions

A partir d'une solution mère de concentration c_0 = 0,1 mol.dm^{-3} et du tableau ci-dessous :

c (mol.dm^{-3})	0,05	0,025	0,01	0,005	0,002	0,001
pipette (cm^3)	50	25	10	5	2	5
fiole (cm^3)	100	100	100	100	100	500

- Préparer des solutions de plus en plus diluées. La qualité des résultats dépend avant tout du soin avec lequel ces dilutions sont effectuées.
- Chaque fois, prélever à la pipette le volume de solution mère indiquée,
- L'introduire dans la fiole jaugée,
- Compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée.

1.2. Mesures

- Mesurez la conductivité de chacune des solutions sans oublier la solution mère.
- Pensez à apprécier l'incertitude pour chaque mesure.

1.3. Tableau des résultats

On effectuera les calculs suivants en tenant compte des incertitudes de mesure pour exprimer les résultats avec le nombre convenable de chiffres significatifs :

c (mol.dm^{-3})	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,002	0,001
C (mol.**m**$^{-3}$)							
γ (S.m^{-1})							
$\Lambda = \gamma / C$ (S.m^2.mol^{-1})							
$\sqrt{C}$ (mol$^{1/2}$.m$^{-3/2}$)							

Remarque
Dans tous les calculs, les concentrations sont à exprimer en mol.m^{-3}, c'est-à-dire en se plaçant dans le Système International d'unités. Si l'on conserve la mol par litre comme unité de concentration, on aurait :

$$\Lambda = \frac{\gamma}{1000 \cdot c}$$

1.4. Exploitation des résultats

- Tracez les courbes $\Lambda = f(C)$ et $\Lambda = f(\sqrt{C})$ (courbes 1 et 2). Commentez-les brièvement.
- Donnez l'équation de la seconde courbe.
- Effectuez sur cette seconde courbe l'extrapolation molaire limite $\Lambda°$ du bromate de potassium.

2. Étude des propriétés d'un électrolyte faible

On étudie une série de solutions d'acide acétique CH_3COOH.

2.1. Préparation d'une série de solutions

A partir de la solution mère de concentration c = 1 mol.L^{-1}, effectuer les dilutions suivantes :

c (mol.dm^{-3})	0,5	0,25	0,1	0,05	0,01	0,004	0,002
pipette (cm^3)	50	25	10	5	5	2	1
fiole (cm^3)	100	100	100	100	500	500	500

2.2. Mesures

- ☞ Mesurer au conductimètre la conductivité de chacune des solutions, sans oublier la solution mère.
- ☞ Apprécier l'incertitude de chaque mesure.

2.3. Tableau des résultats

c (mol.dm^{-3})	1	0,5	0,25	0,1	0,05	0,01	0,004	0,002
C (mol.**m**$^{-3}$)								
γ (S.m^{-1})								
$\Lambda = \gamma / C$ (S.m^2.mol^{-1})								
$\sqrt{C}$ (mol$^{1/2}$.m$^{-3/2}$)								

2.4. Exploitation des résultats

a. Conductivité des solutions

- ☞ Calculer le rapport des conductivités de l'électrolyte fort et de l'électrolyte faible. Présenter les résultats sous forme d'un tableau. Comment ce rapport évolue-t-il ?
- ☞ A concentrations C égales, comparer les valeurs de la conductivité γ pour les solutions d'acide acétique et celles de bromate de potassium.

b. Comportement de l'électrolyte faible

- ☞ Tracer les courbes $\Lambda = f(C)$ et $\Lambda = f(\sqrt{C})$ (courbes 3 et 4). Les comparer à celles que l'on a obtenues pour l'électrolyte fort.
- ☞ La détermination de la conductivité molaire limite semble-t-elle possible avec une précision acceptable comme elle l'était dans le cas précédent ?

c. Calcul de la conductivité molaire limite

Si la loi de dilution d'Ostwald est vérifiée, l'électrolyte faible tend à se dissocier complètement à dilution infinie, donc à se comporter comme un électrolyte fort. Par ailleurs, l'additivité des conductivités permet d'écrire

$$\Lambda^\circ_{CH_3COOH} = \Lambda^\circ_{H_3O^+Cl^-} + \Lambda^\circ_{Na^+CH_3COO^-} - \Lambda^\circ_{Na^+Cl^-}$$

Les mesures par extrapolation pour ces différents électrolytes forts donnent à 18°C :

$$\Lambda^\circ_{H_3O^+Cl^-} = 379\times10^{-4}\,S.m^2.mol^{-1}$$

$$\Lambda^\circ_{Na^+CH_3COO^-} = 87\times10^{-4}\,S.m^2.mol^{-1}$$

$$\Lambda^\circ_{Na^+Cl^-} = 109\times10^{-4}\,S.m^2.mol^{-1}$$

Soit pour l'acide acétique :

$$\Lambda^\circ_{CH_3COOH} = 357\times10^{-4}\,S.m^2.mol^{-1}$$

C'est cette valeur que l'on adoptera pour les calculs.

d. Étude du coefficient de dissociation

☞ Pour chaque valeur de la concentration *C*, calculer le coefficient de dissociation α de l'acide acétique en utilisant la relation :

☞ $$\alpha = \frac{\gamma}{C\cdot\Lambda^\circ}$$

☞ Dresser un tableau des résultats.

☞ Tracer la courbe $\alpha = f(C)$ et la courbe $\alpha = f\left(\frac{1}{\sqrt{C}}\right)$ (courbes 5 et 6).

☞ Les formes obtenues sont-elles celles que la loi de dilution d'Ostwald laissait prévoir ?

☞ Donner l'équation de la courbe 6. A quoi correspond la relation obtenue ?

☞ Aux concentrations habituellement utilisées (0,05 à 1 mol/L), la dissociation de l'acide acétique est-elle importante ?

e. Calcul de la constante d'acidité

En utilisant la relation : $K_a = \frac{c\cdot\alpha^2}{1-\alpha}$ et la définition $pK_a = -\log K_a$

Compléter le tableau suivant :

c (mol.L^{-1})							
K_a							
pK_a							

N.B. : *Pour les calculs de constantes d'équilibre, il faut utiliser la concentration en mol/L.*

☞ Que peut-on dire des valeurs obtenues ?

☞ Exprimer le résultat final avec le nombre correct de chiffres significatifs compte tenu de la précision des mesures effectuées.

☞ Ce résultat justifie-t-il le mode de détermination du coefficient de dissociation de l'électrolyte faible étudié ?

TP N°7

Étude de sondes résistives de température

Trois sondes résistives sont étudiées simultanément :

- une sonde constituée par du fil de cuivre de résistance de l'ordre de 25 Ω,
- une sonde dite "Pt 100" constituée d'un fil de platine de résistance 100 Ω à 0°C,
- une thermistance C.T.N. (thermistance à Coefficient de Température Négatif).

Le but est d'établir pour chaque type de sonde une relation d'étalonnage reliant la résistance à la température.

1. Montage

Les trois sondes sont étudiées simultanément. Chacune est placée dans un tube à essais. Le tube contenant le fil de cuivre (verni) contient de la glycérine. Les trois tubes sont installés dans une cuve thermostatique aussi près que possible les uns des autres. Un thermomètre numérique est placé dans la cuve, près des tubes.

Un multimètre numérique, utilisé comme ohmmètre, permet de lire, à chaque température, la valeur de la résistance de chacune des sondes.

2. Mode opératoire

2.1. Première mesure

- ☞ Introduire de la glace dans la cuve thermostatique remplie d'eau.
- ☞ Agiter manuellement et attendre que la température se stabilise. On lit alors la température θ_0 sur le thermomètre.
- ☞ Mesurer successivement à cette température θ_0 les résistances des trois sondes que l'on notera : R_{Cuo}, R_{Pto}, et R_{CTNo}.

2.2. Mesures suivantes

- ☞ Enlever la glace qui reste dans la cuve.
- ☞ En utilisant le chauffage, réaliser alors, au vol, une série de 15 mesures bien réparties à différentes températures jusqu'aux environs de 50°C.
- ☞ Pour chaque relevé, attendre que la température θ lue sur le thermomètre soit stable avant de mesurer les résistances des sondes[5].

3. Saisie des résultats

Elle sera faite à l'aide du logiciel Reg Win, les données étant entrées au clavier sous forme de tableau de valeurs.

Si le thermomètre indiquait une valeur θ_0 différente de zéro quand elle était plongée dans la glace fondante, il faut tenir compte d'un déplacement de zéro et alors :

$$\theta_{vraie} = \theta_{lue} - \theta_0$$

Sinon, $\theta_{vraie} = \theta_{lue}$!

Dresser, dans le logiciel, le tableau avec les grandeurs suivantes:

θ_{lue} (°C)	θ_{vraie} (°C)[6]	$R_{Cu}(\Omega)$	$R_{Pt}(\Omega)$	$R_{CTN}(\Omega)$

[5] N'attendez pas la stabilisation de la valeur de R_{CTN} ; c'est impossible à réaliser.

[6] Pour créer une nouvelle grandeur dans Regressi, voir le document à la fin de ce polycopié (paragraphe 7)

Quand la saisie des données est terminée, effectuer une sauvegarde en enregistrant votre travail (disquette, clé usb, dossier dédié…).

☞ Imprimer le tableau de vos mesures.

4. Exploitation des résultats

4.1. Pour le cuivre et le platine

☞ Observer les deux graphes $R_{Pt} = f(\theta)$ et $R_{Cu} = f(\theta)$

☞ Chercher les droites de régression et noter les résultats.

☞ Donner les relations $R_{Pt} = f(\theta)$ et $R_{Cu} = f(\theta)$.

☞ Quelle est la signification **physique** des coefficients obtenus ?

☞ Quelles sont les sensibilités des deux sondes s_{Pt} et s_{Cu} définies par $s = \left|\frac{dR}{d\theta}\right|$

☞ Ces sensibilités dépendent-elles de la température ?

☞ Calculer le coefficient de température α_{Pt} et α_{Cu} des deux métaux : $\alpha = \frac{1}{R_0} \times \frac{dR}{d\theta}$

☞ Ces coefficients de température dépendent-ils de la température ?

4.2. Pour la C.T.N.

☞ Après avoir créer les grandeurs nécessaires dans le logiciel, dresser le tableau :

R_{CTN} (Ω)	$\ln R_{CTN}$ (Ω)	$T = \theta + 273$ (K)	$1/T$ (K^{-1})

☞ Tracez : $\ln R_{CTN} = f(1/T)$

☞ Cherchez la droite de régression et notez ses résultats..

☞ Quelle relation $R = f(T)$ peut-on déduire ?

☞ Quelle est alors selon ce modèle l'expression littérale de la sensibilité définie par $s = \left|\frac{dR}{d\theta}\right|$

☞ En utilisant le logiciel, calculez la pour différentes températures :

θ *(°C)*	T (K)	s ($\Omega.K^{-1}$)

☞ Commenter ce tableau.

☞ En utilisant la relation $R_{CTN} = f(T)$ que vous venez d'établir, donner l'expression littérale du coefficient de température α_{CTN} défini par :

$$\alpha_{CTN} = \frac{1}{R_{CTN}} \times \frac{dR_{CTN}}{d\theta}$$

☞ En utilisant le logiciel, faites calculer ce coefficient de température pour différentes températures :

θ (°C)	T (K)	α (K^{-1})

☞ Imprimer le tableau.
☞ Commenter ce tableau.

5. Analyses et conclusions

☞ Comparer les résultats obtenus pour les deux métaux (Cu et Pt) :
- allure de la relation $R = f(\theta)$;
- valeur du coefficient de température α ;
- valeur de la sensibilité s.

☞ A quoi peut être due la(les) différence(s) observée(s) ?
☞ Une sonde platine 50 Ω serait plus économique que la sonde Pt 100. Quel inconvénient présenterait-elle ?
☞ A partir de la table de correspondance fournie page suivante, dans quelle mesure pouvez-vous affirmer que vos relevés ont été corrects ? Y a-t-il eu une erreur systématique ? Si oui, comment la corriger ?
☞ Comparer les résultats fournis par les métaux et la C.T.N. :
- allure de la relation $R = f(T)$,
- sensibilité.

TABLES DE CORRESPONDANCE

SONDE PLATINE PT 100

Résistance en fonction de la température (de 0°C à 149°C)

***t*/°C**	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	***t*/°C**
0	100,00	100,39	100,78	101,17	101,56	101,95	102,34	102,73	103.12	103.51	0
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	10
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.28	20
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	113.99	114.38	114.77	115.15	30
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.85	118.24	118.62	119.01	40
50	119.40	119.78	120.16	120.55	120.93	121.32	121.70	122.09	122.47	122.86	50
60	123.24	123.62	124.01	124.39	124.77	125.16	125.54	125.92	126.31	126.69	60
70	127.07	127.45	127.84	128.22	128.60	128.98	129.37	129.75	130.13	130.51	70
80	130.89	131.27	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.56	133.94	134.32	80
90	134.70	135.08	135.46	135.84	136.22	136.60	136.98	137.36	137.74	138.12	90
100	138.5	138.88	139.26	139.64	140.02	140.39	140.77	141.15	141.53	141.91	100
110	142.29	142.66	143.04	143.42	143.80	144.17	144.55	144.93	145.31	145.68	110
120	146.06	146.44	146.81	147.19	147.57	147.94	148.32	148.70	149.07	149.45	120
130	149.82	150.20	150.57	150.95	151.33	151.70	152.08	152.45	152.83	153.20	130
140	153.58	153.95	154.32	154.70	155.07	155.45	155.82	156.19	156.57	156.94	140

Mode d'emploi : Lire les dizaines dans les lignes et les unités dans les colonnes.
Par exemple, la valeur à 104°C est obtenue à l'intersection de la ligne 100 et de la colonne 4 : 140,02 Ω.

TP N°8

Étude d'un thermocouple

On mesurera la f.e.m. du thermocouple à différentes températures connues. Ici encore, les mesures n'ont de sens que si ces températures sont constantes pendant leur déroulement. Pour obtenir des températures constantes et connues, on fait appel ici à des phénomènes de changements d'état de corps purs.

1. Montage du thermocouple

Les deux soudures sont identiques mais une d'elles sera la « soudure froide ».

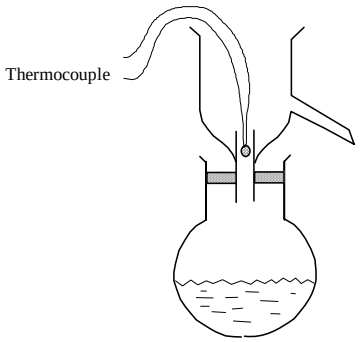
- ☞ Plongez la "soudure froide" dans un vase Dewar contenant de l'eau et de la glace (en cours de manipulation, il faudra penser à vérifier la présence de glace). La "soudure froide" est ainsi maintenue à la température constante de 0°C.
- ☞ Reliez alors le thermocouple au voltmètre.
- ☞ Corriger éventuellement le branchement de façon à respecter le mode de fonctionnement du voltmètre (tension affichée positive).
- ☞ Notez le mode de calcul de l'exactitude du voltmètre.

2. Étalonnage du thermocouple

2.1. Vérification du point zéro

- ☞ Plonger la soudure chaude, avec la soudure froide, dans la glace fondante.
- ☞ Noter l'indication du voltmètre lorsqu'elle s'est bien stabilisée. Cela caractérise l'équilibre thermique de la soudure chaude avec le bain.

2.2. Au point 100°C



- ☞ Dans un ballon de Berthelot, introduire de l'eau (1/3 environ) et quelques grains de ponce sulfurique (ou de Carborundum) destinés à régulariser l'ébullition.
- ☞ Porter à ébullition.
- ☞ Introduire la soudure chaude de telle sorte qu'elle baigne dans la vapeur au niveau où l'eau se condense.
- ☞ Lorsque l'indication du voltmètre est bien stabilisée, en relever la valeur que l'on notera E_{100}.

2.3. Relevés aux points de solidification de trois corps purs

On utilisera deux métaux et de l'acétate de sodium tri hydraté

a. Pour les métaux

Les températures de solidification sont données ci-dessous :

- Étain (Sn) : 231°C
- Plomb (Pb) : 327°C

Les solides sont préparés dans des creusets réfractaires. Un tube à hémolyse protégera la soudure chaude contre les souillures par le corps en fusion. La surface est souvent recouverte par une couche d'oxyde formée au contact de l'air pendant des chauffages successifs précédents. Insolubles dans le corps pur, très peu fusibles et moins denses que le corps pur, ces oxydes ne gênent pas la mesure.

ATTENTION

- Les brûlures par les métaux liquides sont particulièrement graves.
- Manipuler les creusets avec précautions :
  - pinces métalliques ;
  - s'assurer de la stabilité du creuset dans le bec électrique avant de commencer à chauffer.
- Ne jamais poser un creuset chaud sur une paillasse, mais le remettre dans le support.
- Prévenir éventuellement les autres utilisateurs que le creuset est chaud.

☞ Introduire le creuset dans le bec électrique (Hoffmann).

☞ Chauffer et porter à l'état liquide. Ne pas surchauffer exagérément.

☞ Placer la soudure chaude dans le tube à hémolyse dès le début du chauffage, ainsi, elle sera en équilibre thermique avec le métal.

☞ Arrêter le chauffage et laisser refroidir le liquide à un rythme aussi lent et régulier que possible. Éviter les courants d'air et ne pas agiter, mais maintenir la soudure de telle sorte qu'elle soit vraiment en équilibre thermique avec le milieu (ne pas laisser "flotter" le tube à hémolyse sur le liquide).

Pendant toute la phase de refroidissement, noter **toutes les 10 secondes** l'indication du voltmètre. Ne pas cesser d'observer le creuset : il faut repérer le moment où la solidification se produit. Elle se déroule à température constante et se traduit donc par une stabilisation temporaire de l'indication du voltmètre. Quand on constate que l'indication du voltmètre recommence à diminuer, la solidification est terminée : on arrête alors les relevés.

Plutôt que de relever les valeurs sous la forme d'un tableau, on a intérêt à placer directement les points expérimentaux sur une feuille de papier millimétré : on voit ainsi la courbe de refroidissement et le palier de solidification prendre forme au fur et à mesure des relevés.

Pour le plomb surtout, dont la température de solidification est la plus élevée, il peut arriver que le palier de changement d'état ne soit pas très net parce que le refroidissement est trop rapide. Recommencer alors les mesures en maintenant sous le creuset un léger chauffage.

Si vous n'êtes pas très sûrs de votre résultat, vous avez intérêt à réchauffer et refondre le solide immédiatement pour pouvoir faire une nouvelle mesure sans perdre de temps.

b. Pour l'acétate de sodium

Sa température de solidification est de 58°C.

Son chauffage sera effectué au bain-marie rempli d'eau chaude (> 58°C). On pourra ainsi repérer visuellement la f.e.m correspondant au changement d'état.

3. Exploitation des résultats

Elle est encore faite avec le logiciel Reg Win.

3.1. Courbes de solidification

Si ces courbes n'ont pas été tracées au fur et à mesure de la manipulation, il faut maintenant entrer sous la forme d'un tableau de valeur les indications du voltmètre relevées pendant l'étude de la solidification des deux métaux :

temps (s)	E_{Sn} (mV)	E_{Pb}(mV)

Quand la saisie des données est terminée, sauvegarder votre travail sur support électronique (disquette, clé usb, etc.)

- ☞ Tracer les deux courbes de solidification $E = f(t)$.
- ☞ Modéliser chacune des trois parties des ces courbes : refroidissement du liquide, solidification à température constante, refroidissement du solide, en choisissant convenablement les intervalles pour les calculs de modélisation linéaire.
- ☞ Relever alors sur chacune la valeur de la f.e.m au moment de la solidification.

3.2. Tableau récapitulatif des valeurs

- ☞ Dresser le tableau (Reg Win) :

θ (°C)	0	58	100	231	327
E (mV)					
$u_B(E)$ (mV)					

3.3. Graphe

- ☞ Tracer la courbe : $E = f(\theta)$. C'est la courbe d'étalonnage du thermocouple.

3.4. Calculs

- ☞ Chercher la droite de régression.
- ☞ En déduire la relation : $E = f(\theta)$.
  - ▫ Que remarque-t-on ?
  - ▫ Donner la signification physique du coefficient obtenu.
- ☞ Indiquer la sensibilité du thermocouple.
- ☞ Quelle serait la relation qui donnerait la température connaissant la f.e.m ?

4. Comparaison avec des tables

Vous avez étalonné un thermocouple de type inconnu.

- ☞ En utilisant les tables de correspondance fournie à partir de la page suivante, de quel type de thermocouple s'agit-il ?
- ☞ Quelle erreur relative avez-vous commis sur chaque point ?
- ☞ Quelle est l'erreur relative moyenne ?
- ☞ L'écart éventuellement relevé est-il dû à l'appareil de mesure ou y a-t-il eu erreur systématique ?

TABLES DE CORRESPONDANCE DES THERMOCOUPLES

THERMOCOUPLE E

Chromel – Constantan

Utilisable de -270°C à 1000°C

ITS-90 Table pour thermocouple de type E Thermoelectric Voltage in mV											
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.000	0.059	0.118	0.176	0.235	0.294	0.354	0.413	0.472	0.532	0.591
10	0.591	0.651	0.711	0.770	0.830	0.890	0.950	1.010	1.071	1.131	1.192
20	1.192	1.252	1.313	1.373	1.434	1.495	1.556	1.617	1.678	1.740	1.801
30	1.801	1.862	1.924	1.986	2.047	2.109	2.171	2.233	2.295	2.357	2.420
40	2.420	2.482	2.545	2.607	2.670	2.733	2.795	2.858	2.921	2.984	3.048
50	3.048	3.111	3.174	3.238	3.301	3.365	3.429	3.492	3.556	3.620	3.685
60	3.685	3.749	3.813	3.877	3.942	4.006	4.071	4.136	4.200	4.265	4.330
70	4.330	4.395	4.460	4.526	4.591	4.656	4.722	4.788	4.853	4.919	4.985
80	4.985	5.051	5.117	5.183	5.249	5.315	5.382	5.448	5.514	5.581	5.648
90	5.648	5.714	5.781	5.848	5.915	5.982	6.049	6.117	6.184	6.251	6.319
100	6.319	6.386	6.454	6.522	6.590	6.658	6.725	6.794	6.862	6.930	6.998
110	6.998	7.066	7.135	7.203	7.272	7.341	7.409	7.478	7.547	7.616	7.685
120	7.685	7.754	7.823	7.892	7.962	8.031	8.101	8.170	8.240	8.309	8.379
130	8.379	8.449	8.519	8.589	8.659	8.729	8.799	8.869	8.940	9.010	9.081
140	9.081	9.151	9.222	9.292	9.363	9.434	9.505	9.576	9.647	9.718	9.789
150	9.789	9.860	9.931	10.003	10.074	10.145	10.217	10.288	10.360	10.432	10.503
160	10.503	10.575	10.647	10.719	10.791	10.863	10.935	11.007	11.080	11.152	11.224
170	11.224	11.297	11.369	11.442	11.514	11.587	11.660	11.733	11.805	11.878	11.951
180	11.951	12.024	12.097	12.170	12.243	12.317	12.390	12.463	12.537	12.610	12.684
190	12.684	12.757	12.831	12.904	12.978	13.052	13.126	13.199	13.273	13.347	13.421
200	13.421	13.495	13.569	13.644	13.718	13.792	13.866	13.941	14.015	14.090	14.164
210	14.164	14.239	14.313	14.388	14.463	14.537	14.612	14.687	14.762	14.837	14.912
220	14.912	14.987	15.062	15.137	15.212	15.287	15.362	15.438	15.513	15.588	15.664
230	15.664	15.739	15.815	15.890	15.966	16.041	16.117	16.193	16.269	16.344	16.420
240	16.420	16.496	16.572	16.648	16.724	16.800	16.876	16.952	17.028	17.104	17.181
250	17.181	17.257	17.333	17.409	17.486	17.562	17.639	17.715	17.792	17.868	17.945
260	17.945	18.021	18.098	18.175	18.252	18.328	18.405	18.482	18.559	18.636	18.713
270	18.713	18.790	18.867	18.944	19.021	19.098	19.175	19.252	19.330	19.407	19.484
280	19.484	19.561	19.639	19.716	19.794	19.871	19.948	20.026	20.103	20.181	20.259
290	20.259	20.336	20.414	20.492	20.569	20.647	20.725	20.803	20.880	20.958	21.036
300	21.036	21.114	21.192	21.270	21.348	21.426	21.504	21.582	21.660	21.739	21.817
310	21.817	21.895	21.973	22.051	22.130	22.208	22.286	22.365	22.443	22.522	22.600
320	22.600	22.678	22.757	22.835	22.914	22.993	23.071	23.150	23.228	23.307	23.386
330	23.386	23.464	23.543	23.622	23.701	23.780	23.858	23.937	24.016	24.095	24.174
340	24.174	24.253	24.332	24.411	24.490	24.569	24.648	24.727	24.806	24.885	24.964
350	24.964	25.044	25.123	25.202	25.281	25.360	25.440	25.519	25.598	25.678	25.757
360	25.757	25.836	25.916	25.995	26.075	26.154	26.233	26.313	26.392	26.472	26.552
370	26.552	26.631	26.711	26.790	26.870	26.950	27.029	27.109	27.189	27.268	27.348
380	27.348	27.428	27.507	27.587	27.667	27.747	27.827	27.907	27.986	28.066	28.146
390	28.146	28.226	28.306	28.386	28.466	28.546	28.626	28.706	28.786	28.866	28.946
400	28.946	29.026	29.106	29.186	29.266	29.346	29.427	29.507	29.587	29.667	29.747
410	29.747	29.827	29.908	29.988	30.068	30.148	30.229	30.309	30.389	30.470	30.550
420	30.550	30.630	30.711	30.791	30.871	30.952	31.032	31.112	31.193	31.273	31.354
430	31.354	31.434	31.515	31.595	31.676	31.756	31.837	31.917	31.998	32.078	32.159
440	32.159	32.239	32.320	32.400	32.481	32.562	32.642	32.723	32.803	32.884	32.965
450	32.965	33.045	33.126	33.207	33.287	33.368	33.449	33.529	33.610	33.691	33.772
460	33.772	33.852	33.933	34.014	34.095	34.175	34.256	34.337	34.418	34.498	34.579
470	34.579	34.660	34.741	34.822	34.902	34.983	35.064	35.145	35.226	35.307	35.387
480	35.387	35.468	35.549	35.630	35.711	35.792	35.873	35.954	36.034	36.115	36.196
490	36.196	36.277	36.358	36.439	36.520	36.601	36.682	36.763	36.843	36.924	37.005
500	37.005	37.086	37.167	37.248	37.329	37.410	37.491	37.572	37.653	37.734	37.815
510	37.815	37.896	37.977	38.058	38.139	38.220	38.300	38.381	38.462	38.543	38.624
520	38.624	38.705	38.786	38.867	38.948	39.029	39.110	39.191	39.272	39.353	39.434
530	39.434	39.515	39.596	39.677	39.758	39.839	39.920	40.001	40.082	40.163	40.243
540	40.243	40.324	40.405	40.486	40.567	40.648	40.729	40.810	40.891	40.972	41.053
550	41.053	41.134	41.215	41.296	41.377	41.457	41.538	41.619	41.700	41.781	41.862
560	41.862	41.943	42.024	42.105	42.185	42.266	42.347	42.428	42.509	42.590	42.671
570	42.671	42.751	42.832	42.913	42.994	43.075	43.156	43.236	43.317	43.398	43.479
580	43.479	43.560	43.640	43.721	43.802	43.883	43.963	44.044	44.125	44.206	44.286
590	44.286	44.367	44.448	44.529	44.609	44.690	44.771	44.851	44.932	45.013	45.093
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

THERMOCOUPLE J

Fer – Constantan

Utilisable de -210°C à 1149°C

ITS-90 Table pour thermocouple de type J Tension à vide exprimée en mV											
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.814	0.865	0.916	0.968	1.019
20	1.019	1.071	1.122	1.174	1.226	1.277	1.329	1.381	1.433	1.485	1.537
30	1.537	1.589	1.641	1.693	1.745	1.797	1.849	1.902	1.954	2.006	2.059
40	2.059	2.111	2.164	2.216	2.269	2.322	2.374	2.427	2.480	2.532	2.585
50	2.585	2.638	2.691	2.744	2.797	2.850	2.903	2.956	3.009	3.062	3.116
60	3.116	3.169	3.222	3.275	3.329	3.382	3.436	3.489	3.543	3.596	3.650
70	3.650	3.703	3.757	3.810	3.864	3.918	3.971	4.025	4.079	4.133	4.187
80	4.187	4.240	4.294	4.348	4.402	4.456	4.510	4.564	4.618	4.672	4.726
90	4.726	4.781	4.835	4.889	4.943	4.997	5.052	5.106	5.160	5.215	5.269
100	5.269	5.323	5.378	5.432	5.487	5.541	5.595	5.650	5.705	5.759	5.814
110	5.814	5.868	5.923	5.977	6.032	6.087	6.141	6.196	6.251	6.306	6.360
120	6.360	6.415	6.470	6.525	6.579	6.634	6.689	6.744	6.799	6.854	6.909
130	6.909	6.964	7.019	7.074	7.129	7.184	7.239	7.294	7.349	7.404	7.459
140	7.459	7.514	7.569	7.624	7.679	7.734	7.789	7.844	7.900	7.955	8.010
150	8.010	8.065	8.120	8.175	8.231	8.286	8.341	8.396	8.452	8.507	8.562
160	8.562	8.618	8.673	8.728	8.783	8.839	8.894	8.949	9.005	9.060	9.115
170	9.115	9.171	9.226	9.282	9.337	9.392	9.448	9.503	9.559	9.614	9.669
180	9.669	9.725	9.780	9.836	9.891	9.947	10.002	10.057	10.113	10.168	10.224
190	10.224	10.279	10.335	10.390	10.446	10.501	10.557	10.612	10.668	10.723	10.779
200	10.779	10.834	10.890	10.945	11.001	11.056	11.112	11.167	11.223	11.278	11.334
210	11.334	11.389	11.445	11.501	11.556	11.612	11.667	11.723	11.778	11.834	11.889
220	11.889	11.945	12.000	12.056	12.111	12.167	12.222	12.278	12.334	12.389	12.445
230	12.445	12.500	12.556	12.611	12.667	12.722	12.778	12.833	12.889	12.944	13.000
240	13.000	13.056	13.111	13.167	13.222	13.278	13.333	13.389	13.444	13.500	13.555
250	13.555	13.611	13.666	13.722	13.777	13.833	13.888	13.944	13.999	14.055	14.110
260	14.110	14.166	14.221	14.277	14.332	14.388	14.443	14.499	14.554	14.609	14.665
270	14.665	14.720	14.776	14.831	14.887	14.942	14.998	15.053	15.109	15.164	15.219
280	15.219	15.275	15.330	15.386	15.441	15.496	15.552	15.607	15.663	15.718	15.773
290	15.773	15.829	15.884	15.940	15.995	16.050	16.106	16.161	16.216	16.272	16.327
300	16.327	16.383	16.438	16.493	16.549	16.604	16.659	16.715	16.770	16.825	16.881
310	16.881	16.936	16.991	17.046	17.102	17.157	17.212	17.268	17.323	17.378	17.434
320	17.434	17.489	17.544	17.599	17.655	17.710	17.765	17.820	17.876	17.931	17.986
330	17.986	18.041	18.097	18.152	18.207	18.262	18.318	18.373	18.428	18.483	18.538
340	18.538	18.594	18.649	18.704	18.759	18.814	18.870	18.925	18.980	19.035	19.090
350	19.090	19.146	19.201	19.256	19.311	19.366	19.422	19.477	19.532	19.587	19.642
360	19.642	19.697	19.753	19.808	19.863	19.918	19.973	20.028	20.083	20.139	20.194
370	20.194	20.249	20.304	20.359	20.414	20.469	20.525	20.580	20.635	20.690	20.745
380	20.745	20.800	20.855	20.911	20.966	21.021	21.076	21.131	21.186	21.241	21.297
390	21.297	21.352	21.407	21.462	21.517	21.572	21.627	21.683	21.738	21.793	21.848
400	21.848	21.903	21.958	22.014	22.069	22.124	22.179	22.234	22.289	22.345	22.400
410	22.400	22.455	22.510	22.565	22.620	22.676	22.731	22.786	22.841	22.896	22.952
420	22.952	23.007	23.062	23.117	23.172	23.228	23.283	23.338	23.393	23.449	23.504
430	23.504	23.559	23.614	23.670	23.725	23.780	23.835	23.891	23.946	24.001	24.057
440	24.057	24.112	24.167	24.223	24.278	24.333	24.389	24.444	24.499	24.555	24.610
450	24.610	24.665	24.721	24.776	24.832	24.887	24.943	24.998	25.053	25.109	25.164
460	25.164	25.220	25.275	25.331	25.386	25.442	25.497	25.553	25.608	25.664	25.720
470	25.720	25.775	25.831	25.886	25.942	25.998	26.053	26.109	26.165	26.220	26.276
480	26.276	26.332	26.387	26.443	26.499	26.555	26.610	26.666	26.722	26.778	26.834
490	26.834	26.889	26.945	27.001	27.057	27.113	27.169	27.225	27.281	27.337	27.393
500	27.393	27.449	27.505	27.561	27.617	27.673	27.729	27.785	27.841	27.897	27.953
510	27.953	28.010	28.066	28.122	28.178	28.234	28.291	28.347	28.403	28.460	28.516
520	28.516	28.572	28.629	28.685	28.741	28.798	28.854	28.911	28.967	29.024	29.080
530	29.080	29.137	29.194	29.250	29.307	29.363	29.420	29.477	29.534	29.590	29.647
540	29.647	29.704	29.761	29.818	29.874	29.931	29.988	30.045	30.102	30.159	30.216
550	30.216	30.273	30.330	30.387	30.444	30.502	30.559	30.616	30.673	30.730	30.788
560	30.788	30.845	30.902	30.960	31.017	31.074	31.132	31.189	31.247	31.304	31.362
570	31.362	31.419	31.477	31.535	31.592	31.650	31.708	31.766	31.823	31.881	31.939
580	31.939	31.997	32.055	32.113	32.171	32.229	32.287	32.345	32.403	32.461	32.519
590	32.519	32.577	32.636	32.694	32.752	32.810	32.869	32.927	32.985	33.044	33.102
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

THERMOCOUPLE K

Nickel - Chrome / Nickel – Aluminium

Utilisable de -270°C à 1372 °C

ITS-90 Table pour thermocouple de type K Tension à vide exprimée en mV											
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366
470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644
500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071
510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497
520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924
530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350
540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776
550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203
560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629
570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055
580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480
590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905

THERMOCOUPLE S
Platine / Platine rhodium 10%

ITS-90 Table pour thermocouple de type S Tension à vide exprimée en mV											
°C	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
0	0.000	0.005	0.011	0.016	0.022	0.027	0.033	0.038	0.044	0.050	0.055
10	0.055	0.061	0.067	0.072	0.078	0.084	0.090	0.095	0.101	0.107	0.113
20	0.113	0.119	0.125	0.131	0.137	0.143	0.149	0.155	0.161	0.167	0.173
30	0.173	0.179	0.185	0.191	0.197	0.204	0.210	0.216	0.222	0.229	0.235
40	0.235	0.241	0.248	0.254	0.260	0.267	0.273	0.280	0.286	0.292	0.299
50	0.299	0.305	0.312	0.319	0.325	0.332	0.338	0.345	0.352	0.358	0.365
60	0.365	0.372	0.378	0.385	0.392	0.399	0.405	0.412	0.419	0.426	0.433
70	0.433	0.440	0.446	0.453	0.460	0.467	0.474	0.481	0.488	0.495	0.502
80	0.502	0.509	0.516	0.523	0.530	0.538	0.545	0.552	0.559	0.566	0.573
90	0.573	0.580	0.588	0.595	0.602	0.609	0.617	0.624	0.631	0.639	0.646
100	0.646	0.653	0.661	0.668	0.675	0.683	0.690	0.698	0.705	0.713	0.720
110	0.720	0.727	0.735	0.743	0.750	0.758	0.765	0.773	0.780	0.788	0.795
120	0.795	0.803	0.811	0.818	0.826	0.834	0.841	0.849	0.857	0.865	0.872
130	0.872	0.880	0.888	0.896	0.903	0.911	0.919	0.927	0.935	0.942	0.950
140	0.950	0.958	0.966	0.974	0.982	0.990	0.998	1.006	1.013	1.021	1.029
150	1.029	1.037	1.045	1.053	1.061	1.069	1.077	1.085	1.094	1.102	1.110
160	1.110	1.118	1.126	1.134	1.142	1.150	1.158	1.167	1.175	1.183	1.191
170	1.191	1.199	1.207	1.216	1.224	1.232	1.240	1.249	1.257	1.265	1.273
180	1.273	1.282	1.290	1.298	1.307	1.315	1.323	1.332	1.340	1.348	1.357
190	1.357	1.365	1.373	1.382	1.390	1.399	1.407	1.415	1.424	1.432	1.441
200	1.441	1.449	1.458	1.466	1.475	1.483	1.492	1.500	1.509	1.517	1.526
210	1.526	1.534	1.543	1.551	1.560	1.569	1.577	1.586	1.594	1.603	1.612
220	1.612	1.620	1.629	1.638	1.646	1.655	1.663	1.672	1.681	1.690	1.698
230	1.698	1.707	1.716	1.724	1.733	1.742	1.751	1.759	1.768	1.777	1.786
240	1.786	1.794	1.803	1.812	1.821	1.829	1.838	1.847	1.856	1.865	1.874
250	1.874	1.882	1.891	1.900	1.909	1.918	1.927	1.936	1.944	1.953	1.962
260	1.962	1.971	1.980	1.989	1.998	2.007	2.016	2.025	2.034	2.043	2.052
270	2.052	2.061	2.070	2.078	2.087	2.096	2.105	2.114	2.123	2.132	2.141
280	2.141	2.151	2.160	2.169	2.178	2.187	2.196	2.205	2.214	2.223	2.232
290	2.232	2.241	2.250	2.259	2.268	2.277	2.287	2.296	2.305	2.314	2.323
300	2.323	2.332	2.341	2.350	2.360	2.369	2.378	2.387	2.396	2.405	2.415
310	2.415	2.424	2.433	2.442	2.451	2.461	2.470	2.479	2.488	2.497	2.507
320	2.507	2.516	2.525	2.534	2.544	2.553	2.562	2.571	2.581	2.590	2.599
330	2.599	2.609	2.618	2.627	2.636	2.646	2.655	2.664	2.674	2.683	2.692
340	2.692	2.702	2.711	2.720	2.730	2.739	2.748	2.758	2.767	2.776	2.786
350	2.786	2.795	2.805	2.814	2.823	2.833	2.842	2.851	2.861	2.870	2.880
360	2.880	2.889	2.899	2.908	2.917	2.927	2.936	2.946	2.955	2.965	2.974
370	2.974	2.983	2.993	3.002	3.012	3.021	3.031	3.040	3.050	3.059	3.069
380	3.069	3.078	3.088	3.097	3.107	3.116	3.126	3.135	3.145	3.154	3.164
390	3.164	3.173	3.183	3.192	3.202	3.212	3.221	3.231	3.240	3.250	3.259
400	3.259	3.269	3.279	3.288	3.298	3.307	3.317	3.326	3.336	3.346	3.355
410	3.355	3.365	3.374	3.384	3.394	3.403	3.413	3.423	3.432	3.442	3.451
420	3.451	3.461	3.471	3.480	3.490	3.500	3.509	3.519	3.529	3.538	3.548
430	3.548	3.558	3.567	3.577	3.587	3.596	3.606	3.616	3.626	3.635	3.645
440	3.645	3.655	3.664	3.674	3.684	3.694	3.703	3.713	3.723	3.732	3.742
450	3.742	3.752	3.762	3.771	3.781	3.791	3.801	3.810	3.820	3.830	3.840
460	3.840	3.850	3.859	3.869	3.879	3.889	3.898	3.908	3.918	3.928	3.938
470	3.938	3.947	3.957	3.967	3.977	3.987	3.997	4.006	4.016	4.026	4.036
480	4.036	4.046	4.056	4.065	4.075	4.085	4.095	4.105	4.115	4.125	4.134
490	4.134	4.144	4.154	4.164	4.174	4.184	4.194	4.204	4.213	4.223	4.233
500	4.233	4.243	4.253	4.263	4.273	4.283	4.293	4.303	4.313	4.323	4.332
510	4.332	4.342	4.352	4.362	4.372	4.382	4.392	4.402	4.412	4.422	4.432
520	4.432	4.442	4.452	4.462	4.472	4.482	4.492	4.502	4.512	4.522	4.532
530	4.532	4.542	4.552	4.562	4.572	4.582	4.592	4.602	4.612	4.622	4.632
540	4.632	4.642	4.652	4.662	4.672	4.682	4.692	4.702	4.712	4.722	4.732
550	4.732	4.742	4.752	4.762	4.772	4.782	4.793	4.803	4.813	4.823	4.833
560	4.833	4.843	4.853	4.863	4.873	4.883	4.893	4.904	4.914	4.924	4.934
570	4.934	4.944	4.954	4.964	4.974	4.984	4.995	5.005	5.015	5.025	5.035
580	5.035	5.045	5.055	5.066	5.076	5.086	5.096	5.106	5.116	5.127	5.137
590	5.137	5.147	5.157	5.167	5.178	5.188	5.198	5.208	5.218	5.228	5.239
°C	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**

THERMOCOUPLE T

Cuivre / Constantan

ITS-90 Table pour thermocouple de type T Tension à vide exprimée en mV											
°C	**0**	**01**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.352	0.391
10	0.391	0.431	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.790
20	0.790	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.033	1.074	1.114	1.155	1.196
30	1.196	1.238	1.279	1.320	1.362	1.403	1.445	1.486	1.528	1.570	1.612
40	1.612	1.654	1.696	1.738	1.780	1.823	1.865	1.908	1.950	1.993	2.036
50	2.036	2.079	2.122	2.165	2.208	2.251	2.294	2.338	2.381	2.425	2.468
60	2.468	2.512	2.556	2.600	2.643	2.687	2.732	2.776	2.820	2.864	2.909
70	2.909	2.953	2.998	3.043	3.087	3.132	3.177	3.222	3.267	3.312	3.358
80	3.358	3.403	3.448	3.494	3.539	3.585	3.631	3.677	3.722	3.768	3.814
90	3.814	3.860	3.907	3.953	3.999	4.046	4.092	4.138	4.185	4.232	4.279
100	4.279	4.325	4.372	4.419	4.466	4.513	4.561	4.608	4.655	4.702	4.750
110	4.750	4.798	4.845	4.893	4.941	4.988	5.036	5.084	5.132	5.180	5.228
120	5.228	5.277	5.325	5.373	5.422	5.470	5.519	5.567	5.616	5.665	5.714
130	5.714	5.763	5.812	5.861	5.910	5.959	6.008	6.057	6.107	6.156	6.206
140	6.206	6.255	6.305	6.355	6.404	6.454	6.504	6.554	6.604	6.654	6.704
150	6.704	6.754	6.805	6.855	6.905	6.956	7.006	7.057	7.107	7.158	7.209
160	7.209	7.260	7.310	7.361	7.412	7.463	7.515	7.566	7.617	7.668	7.720
170	7.720	7.771	7.823	7.874	7.926	7.977	8.029	8.081	8.133	8.185	8.237
180	8.237	8.289	8.341	8.393	8.445	8.497	8.550	8.602	8.654	8.707	8.759
190	8.759	8.812	8.865	8.917	8.970	9.023	9.076	9.129	9.182	9.235	9.288
200	9.288	9.341	9.395	9.448	9.501	9.555	9.608	9.662	9.715	9.769	9.822
210	9.822	9.876	9.930	9.984	10.038	10.092	10.146	10.200	10.254	10.308	10.362
220	10.362	10.417	10.471	10.525	10.580	10.634	10.689	10.743	10.798	10.853	10.907
230	10.907	10.962	11.017	11.072	11.127	11.182	11.237	11.292	11.347	11.403	11.458
240	11.458	11.513	11.569	11.624	11.680	11.735	11.791	11.846	11.902	11.958	12.013
250	12.013	12.069	12.125	12.181	12.237	12.293	12.349	12.405	12.461	12.518	12.574
260	12.574	12.630	12.687	12.743	12.799	12.856	12.912	12.969	13.026	13.082	13.139
270	13.139	13.196	13.253	13.310	13.366	13.423	13.480	13.537	13.595	13.652	13.709
280	13.709	13.766	13.823	13.881	13.938	13.995	14.053	14.110	14.168	14.226	14.283
290	14.283	14.341	14.399	14.456	14.514	14.572	14.630	14.688	14.746	14.804	14.862
300	14.862	14.920	14.978	15.036	15.095	15.153	15.211	15.270	15.328	15.386	15.445
310	15.445	15.503	15.562	15.621	15.679	15.738	15.797	15.856	15.914	15.973	16.032
320	16.032	16.091	16.150	16.209	16.268	16.327	16.387	16.446	16.505	16.564	16.624
330	16.624	16.683	16.742	16.802	16.861	16.921	16.980	17.040	17.100	17.159	17.219
340	17.219	17.279	17.339	17.399	17.458	17.518	17.578	17.638	17.698	17.759	17.819
350	17.819	17.879	17.939	17.999	18.060	18.120	18.180	18.241	18.301	18.362	18.422
360	18.422	18.483	18.543	18.604	18.665	18.725	18.786	18.847	18.908	18.969	19.030
370	19.030	19.091	19.152	19.213	19.274	19.335	19.396	19.457	19.518	19.579	19.641
380	19.641	19.702	19.763	19.825	19.886	19.947	20.009	20.070	20.132	20.193	20.255
390	20.255	20.317	20.378	20.440	20.502	20.563	20.625	20.687	20.748	20.810	20.872
400	20.872										
°C	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**

TP N°9

Vérification de la loi de Boyle-Mariotte

Le but de cette séance est avant tout d'apprendre à maîtriser le matériel nécessaire à l'acquisition de données par ordinateur, à savoir :

- L'interface Orphy-GTI
- Le logiciel d'acquisition Win-GTI qui gère l'interface et stocke les données brutes
- Le logiciel de traitement des données Regressi-Windows.

1. Principe

En déplaçant le piston, on fait varier le volume de l'air enfermé dans le corps d'une seringue reliée à un capteur de pression.
Le volume est lu sur le corps de la seringue et est saisi au clavier par l'expérimentateur.
La pression est mesurée par le capteur qui délivre une tension électrique proportionnelle à la pression.
Il est donc possible d'acquérir des couples de données (p, V).

2. Matériel

Une seringue de 60 mL utiles.
Un module capteur de pression de la société Micrélec.
Les caractéristiques du capteur sont les suivantes :
Connexion à établir sur la **voie EA2 prise F** (sur le côté gauche de l'interface)

Étalonnage : $0 < p < 250000$ Pa $\rightarrow 0 < U < 5$V

3. Préparation de l'acquisition

☞ Connecter la sonde de pression sur la prise F voie EA2, calibre 0-5V.

☞ Allumer l'interface : le bouton Marche/Arrêt est sur la face arrière du boîtier.

☞ Lancer le logiciel d'acquisition de données Win-GTI (icône sur le Bureau)

On veut acquérir le volume en abscisse et la pression en ordonnée (coordonnées de Clapeyron).

Paramétrage du volume :

☞ Dans la fenêtre **Mode** choisir

Mode de fonctionnement : **Entrée Clavier** ;

Abscisse **Clavier …** éventuellement **Grille**

Cliquer sur **OK**

Compléter la fenêtre **entrée des données au clavier :** symbole V, unité mL, min 0, max 60 mL.

☞ Dès que la valeur du volume saisie dans la fenêtre en haut à droite est validée, le point (p, V) sera acquis.

Paramétrage de la pression :

☞ Faire un étalonnage manuel de la voie EA2 conformément aux caractéristiques décrites ci-dessus.

4. Acquisitions

Il est possible de vérifier la loi de Mariotte pour les pressions inférieures ou supérieures à la pression atmosphérique. Il y a donc deux façons de procéder.

4.1. Étude en dépression

La seringue étant déconnectée de la feuille anglaise (tube de plastique qui la relie au capteur de pression).

- ☞ Placer le piston à 0, relier la seringue au tuyau.
- ☞ Tirer lentement sur le piston de 2 mL en 2 mL jusqu'à 40 mL.
- ☞ Pour chaque valeur du volume, entrer la valeur au clavier. Lorsque l'on valide (touche Entrée), les valeurs du couple (p, V) sont acquises.
- ☞ Une fois le travail expérimental effectué, enregistrer les données dans le logiciel Regressi-Windows : il y a une icône adaptée dans la barre d'outils.

4.2. Étude en compression

- ☞ Recommencer une acquisition en ayant pris soin de débuter avec un volume initial de 60 mL et en appuyant **lentement** de 2mL en 2mL.
- ☞ Enregistrer le travail dans une seconde page du même fichier de Regressi-Windows.

5. Traitement des données : vérification du modèle « loi de Boyle Mariotte »

- ☞ Pour chacune des deux démarches expérimentales, visualiser les graphes $p = f(V)$
- ☞ Proposer un modèle du type : $p = k/(V0 + V)$.
- ☞ Êtes-vous satisfait du résultat de ce modèle ? Sur quel critère vous appuyez-vous ?
- ☞ Que représentent les paramètres k et $V0$?
- ☞ Quelles sont leurs valeurs et leurs unités ?
- ☞ Les résultats sont-ils compatibles pour les deux façons de procéder ?
- ☞ Imprimer vos graphes et modélisations pour étayer votre compte-rendu.

TP N°10

Mesure du rendement d'un bec Hoffmann

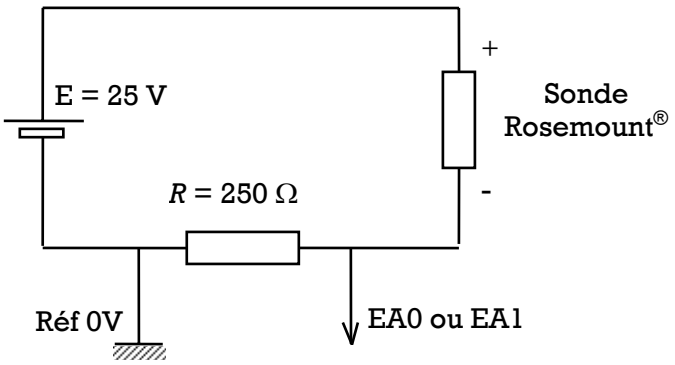
Le but de ce T.P. est encore de bien prendre en main le logiciel d'acquisition et de traitement des données.

- ☞ Rechercher sur la plaque signalétique de l'appareil la puissance *P* de l'appareil.
- ☞ Placer 200 g d'eau dans un becher.
- ☞ Programmer une acquisition en fonction du temps avec une durée de 10 min. (Il est toujours possible d'arrêter l'acquisition avant la fin de la durée programmée).
- ☞ Parce qu'il faut veiller à rester dans les limites de travail de la sonde de température, la durée du chauffage sera de 3 minutes. À l'issue du temps de chauffage, il faut **retirer le becher du bec Hoffmann**.

1. Les capteurs de température utilisés

On peut utiliser deux types de capteurs pour ce TP :

- une sonde industrielle Rosemount® qui contient à l'extrémité d'un doigt de gant en inox un sonde de type Platine 100. Elle présente une tête de conditionnement du signal polarisée d'où émergent deux fils de connexion.
- Un capteur LM35DZ monté sur une prise DIN (Deutsche Industrie Normen)

Sonde Rosemount	**Capteur LM35DZ**
Elle doit être insérée dans le montage électrique série suivant :  • Se connecte sur la **voie EA0 ou EA1 (±5V)** de l'interface par l'intermédiaire d'un boîtier de raccordement bleu (module test). • Etalonnage : o 1 V → 0°C o 5 V → 50°C NB : Par la suite le logiciel d'acquisition relève 0V pour -12,5°C, ne pas s'inquiéter.	• Se connecte sur la **voie EA6 (±1V)** de l'interface • Etalonnage : o 0 V → 0°C o 1 V → 100°C

2. Première façon de procéder : Bec froid au début du chauffage

- ☞ Placer le becher sur le bec Hoffmann et débuter l'acquisition dès son allumage.
- ☞ Enregistrer les données dans un fichier de Regressi-Windows (TP_10.rw3 par exemple).

3. Seconde façon de procéder : Bec chaud au début du chauffage

- Débuter l'acquisition dès que vous placez le becher sur le bec Hoffmann déjà chaud.
- Cette acquisition sera enregistrée sur une **seconde page du même fichier**.

4. Dans les deux cas

- Décrire et comparer les deux courbes obtenues. Expliquer physiquement la différence ?
- On relèvera :
  - La durée du chauffage Δt.
  - L'écart de température $\Delta\theta = \theta_{max} - \theta_0$ après avoir pointé ces valeurs sur le graphe $\theta = f(t)$.
- On calculera :
  - La quantité de chaleur reçue par l'eau pendant la durée Δt

    $Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$ avec $c = 4{,}18\ kJ.K^{-1}.kg^{-1}$
  - Le rendement $\eta = \dfrac{Q}{P \cdot \Delta t}$
- Comparer les deux cas de figure.

5. Étude particulière de la seconde courbe

- Copier votre fichier sous un nouveau nom (Menu Fichier Enregistrer Sous).
- Effectuer une modélisation le long de la partie de la courbe qui correspond au chauffage. Pensez à choisir convenablement les bornes de la modélisation : utilisez le bouton correspondant.
- Que représente **<u>physiquement</u>** le coefficient directeur ?
- Supprimer les points qui n'appartiennent pas à cette partie de la courbe.
- Créer une Grandeur de type Dérivée qui sera définie par $\alpha = d\theta/dt$
- **<u>Démontrer</u>** que ce coefficient directeur est égal au rapport de la puissance reçue par l'eau divisée par le produit de la masse et de la capacité calorifique massique de l'eau. : $\alpha = \dfrac{P_{eau}}{mc}$
- Créer la Grandeur de type Fonction P_{eau}.
- Créer une Grandeur qui donne le rendement.
- Le rendement est-il constant ?
- Si non, quelle est sa valeur moyenne ? Utilisez la fenêtre Statistique (utiliser un des deux boutons pour choisir la variable et l'autre pour afficher le tableau).
- Comparer le résultat de ce travail à la façon de procéder précédente.

TP N°11

Mesures calorimétriques

Ce document rassemble plusieurs mesures qui vont faire l'objet de quatre séances de travaux pratiques. La quasi totalité de ces manipulations utilisent l'ordinateur comme outil d'acquisition de données par l'intermédiaire de l'interface Orphy-G.T.I.
Le capteur est une sonde de température Pt 100 **fonctionnant entre 0 et 50°C**.
Avant de procéder aux mesures calorimétriques proprement dites, on devra effectuer l'étalonnage de cette sonde de façon à ce que l'affichage sur l'écran se fasse directement en température (et non en tension).

LISTE DES DIFFÉRENTES MANIPULATIONS PROPOSÉES :

1. CAPACITÉ THERMIQUE D'UN VASE CALORIMÉTRIQUE
méthode des mélanges : ..... p. 53

2. CAPACITÉ THERMIQUE MASSIQUE D'UN SOLIDE
méthode des mélanges : ..... p. 55

3. CAPACITÉ THERMIQUE D'UN VASE CALORIMÉTRIQUE
méthode électrique : ..... p. 57

4. CAPACITÉ THERMIQUE MASSIQUE D'UN LIQUIDE
méthode électrique : ..... p. 59

5. CHALEUR LATENTE DE FUSION DE LA GLACE
méthode des mélanges : ..... p. 60

6. CHALEUR LATENTE DE VAPORISATION DE L'EAU
méthode des mélanges : ..... p. 62

7. ENTHALPIE DE DISSOLUTION D'UN SOLIDE IONIQUE DANS L'EAU
méthode des mélanges : ..... p. 64

8. ENTHALPIE DE RÉACTIONS ACIDE-BASE
méthode des mélanges : ..... p. 66

9. ENTHALPIE DE LA RÉACTION DU ZINC SUR LE SULFATE DE CUIVRE
méthode des mélanges ..... p. 68

10.ENTHALPIES DE RÉACTIONS ACIDE-BASE
dosages calorimétriques ..... p. 70

- MANIPULATION N°1 -

CAPACITÉ THERMIQUE D'UN VASE CALORIMÉTRIQUE PAR LA MÉTHODE DES MÉLANGES

1. PRINCIPE

Pour que la mesure de la capacité thermique d'un vase calorimétrique ait un sens, elle doit être effectuée exactement dans les conditions où ce même vase sera ensuite utilisé pour des mesures de quantités de chaleur :

- mêmes accessoires, sonde thermométrique et agitateur ;
- et surtout rempli d'eau jusqu'au même niveau, de façon à mettre en jeu la même surface de paroi.

Données expérimentales à relever pendant l'expérience :

masse d'eau chaude initialement présente dans le calorimètre	m_a =		u(m_a) =	
température initiale "stabilisée"	θ_a =		u(θ_a) =	
masse d'eau froide que l'on introduira dans le calorimètre	m_b =		u(m_b) =	
température initiale de l'eau froide	θ_b =		u(θ_b) =	
température finale "stabilisée" du système	θ_f =		u(θ_f) =	
capacité thermique massique de l'eau	c_{eau} =	$4{,}186.10^3$ J.kg^{-1}.K^{-1}		

☞ Écrire l'équation calorimétrique, en considérant le dispositif comme adiabatique.

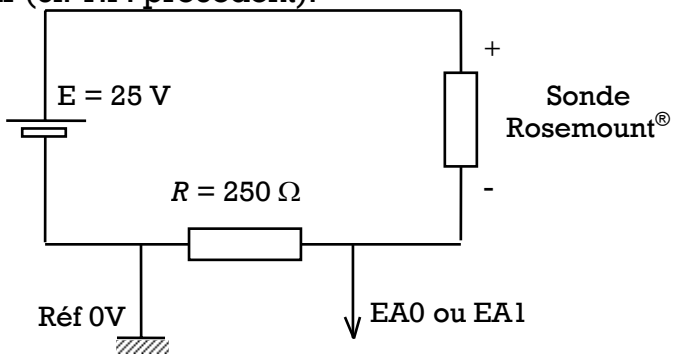
☞ En déduire l'expression littérale de *C*, capacité thermique du calorimètre.

2. MODE OPÉRATOIRE

2.1. Préparation de la mesure

☞ Introduire une masse de 200 g d'eau chaude dans le calorimètre.

☞ Mettre en place la sonde de température et réaliser le montage du circuit électrique du capteur (cf. T.P. précédent).



Etalonnage :
1V → 0°C
5V → 50°C

☞ Préparer 300 g d'eau froide dans un Becher. On relèvera sa température à l'aide de la sonde que l'on introduira ensuite dans le calorimètre contenant l'eau chaude.

2.2. Acquisition de données

☞ L'acquisition se fait *en fonction du temps* : on programmera une durée d'acquisition de *quatre* minutes.

☞ S'assurer que la température initiale du calorimètre affichée est stable.

☞ Commencer l'acquisition.

- ☞ Au bout d'environ 1 à 2 minutes, verser l'eau froide dans le calorimètre, sans oublier de noter sa température θ_b.
- ☞ Quand l'acquisition est terminée, basculer les données du logiciel d'acquisition vers le logiciel de traitement puis enregistrer ces données (TP_11_manip_1.rw3 par exemple).

3. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

3.1. Graphe des résultats

- ☞ Tracer la courbe de variation de la température en fonction du temps: $\theta = f(t)$
- ☞ Sur ce graphe, relever les valeurs θ_a de la température initiale du calorimètre et θ_f sa température finale. Le curseur « données » de l'écran graphique du logiciel RegWin permet de pointer convenablement ces valeurs.

3.2. Calculs

- ☞ A partir de l'équation calorimétrique, calculer numériquement la capacité thermique C du calorimètre.

3.3. Précision de la mesure

Rôle de la balance :

- ☞ Apprécier la précision obtenue sur chacune des deux masses m_a et m_b compte tenu de la sensibilité de la balance utilisée.

Rôle de l'interface :

La précision avec laquelle l'interface GTI effectue la conversion de la tension analogique d'entrée est 1%, le pas de conversion (ou résolution du convertisseur) est ici négligeable.

- ☞ En déduire l'incertitude avec laquelle sont déterminées les différences $(\theta_f - \theta_a)$ et $(\theta_b - \theta_f)$.

L'incertitude sur la mesure de C ?

- ☞ Quel est le facteur qui limite la précision sur la mesure de la capacité thermique C ?
- ☞ La valeur adoptée pour c_{eau} ne comporte-t-elle pas trop de chiffres ?
- ☞ Évaluer l'incertitude u(C) sur la mesure.
- ☞ Était-il justifié de considérer le dispositif comme adiabatique ?

- ☞ **Exprimer le résultat final de votre mesure.**

MANIPULATION N°2

CAPACITÉ THERMIQUE MASSIQUE D'UN SOLIDE PAR LA MÉTHODE DES MÉLANGES

1. PRINCIPE

Données expérimentales à relever pendant l'expérience :

capacité thermique du calorimètre (cf. manipulation 1)	C =		u(C) =	
capacité thermique massique de l'eau	c_{eau} =	$4{,}186.10^3$ J.kg^{-1}.K^{-1}		
masse d'eau initialement présente dans le calorimètre	m_a =		u(m_a) =	
température initiale "stabilisée"	θ_a =		u(θ_a) =	
masse du solide	m_b =		$u(m_b)$ =	
température initiale du solide chauffé	θ_b =		u(θ_b) =	
température finale "stabilisée" du système	θ_f =		u(θ_f) =	

☞ Écrire l'équation calorimétrique, en considérant le dispositif adiabatique.

☞ En déduire l'expression littérale de la capacité thermique massique c du solide.

2. MODE OPÉRATOIRE

2.1. Préparation de la mesure

Le vase calorimétrique doit être en aluminium.

☞ Introduire 350 g d'eau froide dans le calorimètre de capacité thermique C déjà mesurée.

☞ Mettre en place la sonde de température et réaliser le circuit électrique du capteur.

☞ Noter la nature du solide étudié (aluminium, cuivre ou fer)

☞ Peser sur une balance au décigramme et noter sa masse.

☞ Le suspendre dans un Becher contenant de l'eau portée à ébullition.

☞ Maintenir ainsi le solide dans l'eau bouillante pendant environ dix minutes. On pourra alors considérer qu'il a atteint la température d'ébullition de l'eau.

2.2. Acquisition des données

L'acquisition sera faite *en fonction du temps*. On programmera une durée d'acquisition de *quatre* minutes.

☞ Commencer l'acquisition.

☞ S'assurer que la température initiale affichée à l'écran est stable.

☞ Au bout de 1 à 2 minutes, introduire rapidement le solide dans le calorimètre.

☞ Quand l'acquisition est terminée, enregistrer votre le travail.

3. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

3.1. Graphe

☞ Tracer la courbe de la température en fonction du temps.

☞ Relever les valeurs de la température initiale θ_a et de la température finale θ_f.

3.2. Calculs

☞ A partir de l'équation calorimétrique, calculer numériquement la capacité thermique massique *c* du solide étudié.

3.3. Conclusion

☞ Apprécier la précision de la mesure, en vous inspirant du travail effectué pour la manipulation 1.

☞ Rechercher dans des tables (Handbook, base de données internet…) la valeur attendue.

☞ Comparer cette valeur avec votre résultat expérimental.

☞ **Exprimer le résultat final de votre mesure.**

MANIPULATION N°3

CAPACITÉ THERMIQUE D'UN VASE CALORIMÉTRIQUE PAR LA MÉTHODE ÉLECTRIQUE

1. PRINCIPE

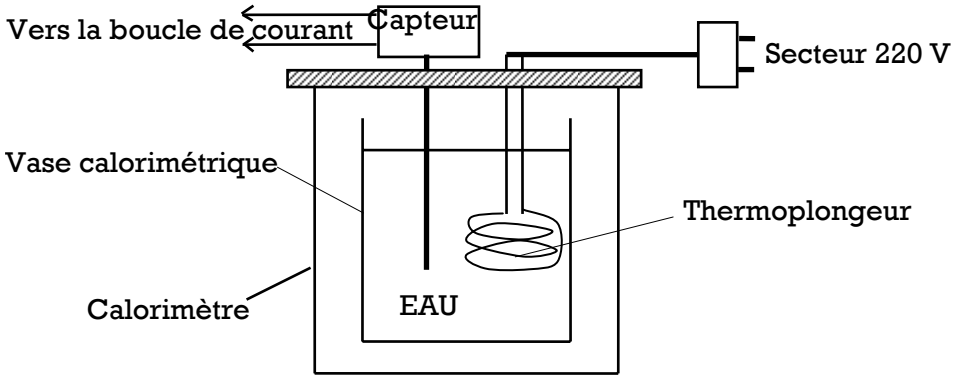
Données expérimentales à relever pendant l'expérience :

capacité thermique massique de l'eau	c_{eau} =	$4{,}186.10^3$ J.kg^{-1}.K^{-1}		
masse d'eau initialement présente dans le calorimètre	m_a =		u(m_a) =	
température initiale "stabilisée"	θ_a =		u(θ_a) =	
température finale "stabilisée" du système	θ_f =		u(θ_f) =	
puissance du thermoplongeur (résistance électrique) utilisée pour le chauffage	P =		u(P) =	
durée du chauffage	t =		u(t) =	

☞ En admettant que le système est adiabatique, écrire l'équation calorimétrique.

☞ En déduire l'expression littérale de la capacité thermique du calorimètre.

2. MONTAGE



3. MODE OPÉRATOIRE

3.1. Préparation de la mesure

Le calorimètre comporte un *vase en aluminium*. Son couvercle est équipé pour maintenir une résistance électrique de chauffage (thermoplongeur) de *puissance nominale* $P \approx 350$ W.

☞ Mesurer au multimètre R et, grâce à la notice calculer u(R).

☞ Mesurer au multimètre U et, grâce à la notice calculer u(U).

☞ En déduire P et u(P).

☞ Introduire m_a = 500 g d'eau froide dans le calorimètre.

☞ Mettre en place la sonde de température et réaliser le circuit électrique du capteur.

Attention : Ne jamais mettre la résistance sous tension tant qu'elle ne plonge pas dans le liquide.

3.2. Acquisition de données

L'acquisition se fait en *fonction du temps*. On programmera une durée de *huit* minutes.

☞ S'assurer que la température initiale affichée à l'écran est stable.

☞ Commencer l'acquisition.

☞ Au bout de 1 à 2 minutes mettre la résistance chauffante sous tension et déclencher le chronomètre en même temps.

Surveiller la température affichée à l'écran et la position du point représentatif de la mesure. θ ne doit jamais atteindre 50°C (le point ne doit jamais monter jusqu' en haut de l'écran). Si, par mégarde, on atteignait cette température, l'acquisition perdrait toute sa signification : la sonde ne répondant que jusqu'à 50°C.

☞ Lorsque la température atteint 40 à 45°C :

- débrancher l'alimentation du thermoplongeur et arrêter le chronomètre en même temps.
- noter la durée *t* qu'il indique : c'est la durée du chauffage. C'est donc le temps pendant lequel la puissance *P* a été fournie au système.
- laisser se poursuivre l'acquisition encore environ deux minutes.

☞ Quand l'acquisition est terminée, enregistrer vos données.

4. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

4.1. Graphe

☞ Tracer la courbe de la température en fonction du temps.

☞ Montrer que l'on peut y distinguer trois étapes et les commenter.

☞ Chercher la droite de régression pour la portion de courbe qui correspond au chauffage de l'eau par le thermoplongeur sous tension.

Soit *a* son coefficient directeur (ou pente) : $a = \dfrac{\text{variation de température}}{\text{durée de chauffage}} = \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$

4.2. Calculs

☞ A partir de l'équation calorimétrique, calculer la capacité thermique du vase calorimétrique.

L'équation calorimétrique laisse prévoir une relation linéaire entre le temps de chauffage *t* et la variation de température (θ_f - θ_a).

Vérifier si : $\dfrac{t}{(\theta_f - \theta_a)} = \dfrac{1}{a}$

☞ La linéarité attendue est-elle vérifiée ?

☞ Évaluer l'écart éventuel en pourcentage.

☞ En faisant apparaître le coefficient *a* dans l'équation calorimétrique, montrer que l'on aurait pu se contenter de déterminer *a* et éviter de mesurer le temps de chauffage *t* ?

4.3. Conclusion

☞ Quel est le facteur expérimental qui limite la précision obtenue pour cette mesure (voir partie I).

☞ **Exprimer le résultat final de votre mesure.**

MANIPULATION N°4

CAPACITÉ THERMIQUE MASSIQUE D'UN LIQUIDE PAR LA: MÉTHODE ÉLECTRIQUE

1. PRINCIPE

En remplaçant l'eau par le liquide étudié (huile de table), de capacité thermique massique *c*, écrire l'équation calorimétrique.

2. MONTAGE

☞ Effectuer le même montage que dans la manipulation précédente.

3. MODE OPÉRATOIRE

☞ Procéder comme dans le cas de l'eau en la remplaçant par 450 g d'huile froide.

☞ Travailler avec le même thermoplongeur que pour la manipulation 3.

4. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

☞ Effectuer le même travail que précédemment *en arrêtant le chauffage à 30°C*.

☞ Comparer les pentes obtenues pour les deux expériences.

☞ Quelle différence remarque-t-on entre les courbes obtenues avec l'eau dans la manipulation 3 et avec l'huile ? Pourquoi cette différence ?

☞ Envisager des conséquences pratiques : l'eau et l'huile sont-ils des fluides caloporteurs de qualité équivalente ?

☞ **Exprimer le résultat final de votre mesure.**

MANIPULATION N°5

CHALEUR LATENTE DE FUSION DE LA GLACE PAR LA MÉTHODE DES MÉLANGES

1. PRINCIPE

Données expérimentales à relever pendant l'expérience :

capacité thermique du calorimètre	C =		u(C) =	
capacité thermique massique de l'eau	c_{eau} =	$4{,}186.10^3$ J.kg^{-1}.K^{-1}		
masse d'eau initialement présente dans le calorimètre	m_a =		u(m_a) =	
température initiale "stabilisée"	θ_a =		u(θ_a) =	
masse de glace introduite dans le calorimètre à 0°C	m_b =		u(m_b) =	
température finale "stabilisée" du système	θ_f =		u(θ_f) =	
durée du chauffage	t =		u(t) =	

- En admettant que le dispositif est adiabatique, on écrira l'équation calorimétrique.
- En déduire l'expression littérale de la chaleur latente de fusion de la glace L_{fus}.

2. MODE OPÉRATOIRE

2.1. Préparation de la mesure

- Dans le calorimètre de capacité thermique C déjà mesurée, introduire 400 g d'eau, à température d'environ 15°C supérieure à la température ambiante.
- Peser le vase intérieur du calorimètre.
- Mettre en place la sonde de température et réaliser le circuit électrique du capteur.
- Dans un becher, placer environ 130 g de glaçons avec un peu d'eau.
- Attendre que la température se stabilise. Notez que, quelque soit l'indication stable du thermomètre, la température est 0°C car il y a équilibre liquide-solide de l'eau.

2.2. Acquisition de données

L'acquisition se fait *en fonction du temps* sur une durée de *dix* minutes.

- S'assurer que la température initiale affichée à l'écran est stable.
- Commencer l'acquisition.
- Au bout de 1 à 2 minutes, introduire les glaçons (à 0°C) que l'on aura rapidement essuyés avec du papier Joseph.
- Quand l'acquisition est terminé, enregistrer votre travail.

a. Mesure de la masse m_b de glace introduite

- Repeser le vase intérieur du calorimètre.
- Par différence avec la valeur de la masse initiale, calculer la valeur de la masse mb de glace réellement introduite.

3. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

3.1. Graphe

☞ Tracer la courbe de la température en fonction du temps.

3.2. Calculs

☞ A partir de l'équation calorimétrique, calculer *la chaleur latente de fusion* de la glace L_f.

☞ Compte tenu de la baisse de température obtenue et des conditions de pesée, apprécier la précision que l'on peut attendre sur cette mesure.

3.3. Conclusion

☞ **Exprimer le résultat final de votre mesure.**

MANIPULATION N°6

CHALEUR LATENTE DE VAPORISATION DE L'EAU PAR LA MÉTHODE DES MÉLANGES

1. PRINCIPE

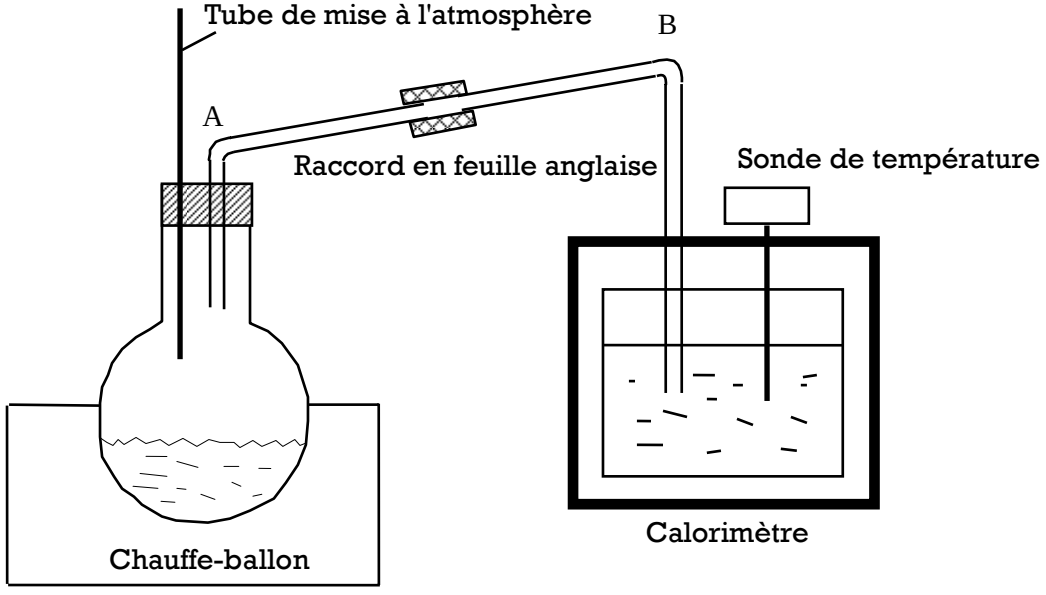
C'est en fait la chaleur de liquéfaction de l'eau que l'on mesurera ici. De la vapeur, générée dans une "chaudière" est reçue dans le calorimètre contenant de l'eau froide et vient s'y liquéfier.

Données expérimentales à relever pendant l'expérience :

capacité thermique du calorimètre	C =		u(C) =	
capacité thermique massique de l'eau	c_{eau} =	$4{,}186.10^3$ J.kg^{-1}.K^{-1}		
masse d'eau initialement présente dans le calorimètre	m_a =		u(m_a) =	
température initiale "stabilisée"	θ_a =		u(θ_a) =	
masse de vapeur introduite dans le calorimètre à 0°C	m_b =		u(m_b) =	
température finale "stabilisée" du système	θ_f =		u(θ_f) =	
durée du chauffage	t =		u(t) =	

- ☞ Écrire l'équation calorimétrique en admettant que la transformation est adiabatique.
- ☞ En déduire l'expression littérale de la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

2. MONTAGE



AB doit être incliné vers la chaudière !

3. MODE OPÉRATOIRE

3.1. Préparation de la mesure

- Introduire 400 g d'eau froide dans le calorimètre de capacité thermique C déjà mesurée.
- Peser le vase intérieur du calorimètre.
- Mettre en place la sonde de température et réaliser le circuit électrique du capteur.
- Dans le ballon qui servira de chaudière, placer de l'eau et quelques grains de ponce sulfurique ou Carborundum.
- Relier en C les deux parties du montage par un petit morceau de feuille anglaise qui pourra être rapidement coupé.
- S'assurer que la branche AB est inclinée vers la chaudière de façon que l'eau qui se condensera dans ce tube non isolé thermiquement ne puisse pas couler dans le calorimètre.
- Mettre en marche le chauffe ballon pour obtenir une vive ébullition.

3.2. Acquisition de données

- L'acquisition se fait en fonction du temps sur une durée de dix minutes.
- Commencer l'acquisition lorsque l'eau arrive à ébullition dans le ballon.
- Surveiller la température affichée à l'écran et la position du point représentatif : θ ne doit pas atteindre 50°C et le point ne doit pas arriver en haut de l'écran, sinon l'acquisition perdrait toute signification.
- Deux minutes avant la fin de l'acquisition (ou plus tôt si la température a déjà atteint 45°C environ), couper le raccord en feuille anglaise pour arrêter l'arrivée de vapeur dans le calorimètre.
- Éteindre alors le chauffe ballon. (Cet ordre est important si l'on ne veut pas avoir de retour d'eau du calorimètre vers le ballon).
- Quand l'acquisition est terminée, enregistrer votre travail.

a. Mesure de la masse m_b de vapeur :

- Repeser le vase intérieur du calorimètre.
- Par différence avec la valeur initiale, déduire la masse de vapeur qui s'est liquéfiée dans le calorimètre.

4. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

4.1. Graphe

- Tracer la courbe de la température en fonction du temps.

4.2. Calculs

- A partir de l'équation calorimétrique, calculer la chaleur latente de vaporisation, Lv.
- Apprécier la précision sur cette mesure.

4.3. Conclusion

- **Exprimer le résultat final de votre mesure.**

MANIPULATION N°7

ENTHALPIE DE DISSOLUTION D'UN SOLIDE IONIQUE DANS L'EAU PAR LA MÉTHODE DES MÉLANGES

1. PRINCIPE

Données expérimentales à relever pendant l'expérience :

capacité thermique du calorimètre	C =		u(C) =	
capacité thermique massique de l'eau	c_{eau} =	$4{,}186.10^3$ J.kg^{-1}.K^{-1}		
masse d'eau initialement présente dans le calorimètre	m_a =		u(m_a) =	
température initiale "stabilisée"	θ_a =		u(θ_a) =	
la masse du solide ionique introduite	m_b =		u(m_b) =	
température finale "stabilisée" du système	θ_f =		u(θ_f) =	

- ☞ Écrire l'équation calorimétrique en admettant que la transformation est adiabatique où l'enthalpie de la réaction est notée $\Delta_r H$.
- ☞ En déduire l'expression littérale de l'enthalpie de réaction $\Delta_r H$.

Remarque : La dissolution étant très rapide, on ne tiendra pas compte de la chaleur correspondant à la variation de température du sel solide.

2. MODE OPÉRATOIRE

2.1. Préparation de la mesure

Le vase calorimétrique doit être en Pyrex.

Le solide ionique étudié est le chlorure d'ammonium.

- ☞ Introduire 400 g d'eau froide dans le calorimètre de capacité thermique C déterminée.
- ☞ Mettre en place la sonde de température et son circuit électrique d'acquisition.
- ☞ Peser, sur une balance au décigramme, une masse m_b de solide ionique de l'ordre de 40 g.

2.2. Acquisition des données

- ☞ Prévoir une acquisition de 6 minutes.
- ☞ S'assurer de la stabilité relative de la température.
- ☞ Commencer l'acquisition.
- ☞ Introduira le sel au bout de deux minutes environ.
- ☞ A la fin de l'acquisition, penser à sauvegarder votre travail.

3. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

3.1. Graphe

- ☞ Tracer la courbe de la température en fonction du temps.

3.2. Calculs

- A partir de l'équation calorimétrique, calculer la quantité de chaleur $\Delta_r H$.
- En déduire l'enthalpie **molaire** de dissolution du chlorure d'ammonium dans l'eau.
- Si l'on note M_{sel} la masse molaire du solide ionique étudié, l'enthalpie molaire de dissolution du sel sera donnée par : $\Delta_r H_m = \frac{\Delta_r H}{n}$ avec $n = \frac{m_b}{M_{sel}}$ et

  M_{NH4Cl} = 53,5 g.mol^{-1}.
- Apprécier la précision sur cette mesure.

3.3. Conclusion

- Que peut-on dire de la dissolution du chlorure d'ammonium dans l'eau ?

- **Exprimer le résultat final de votre mesure.**

MANIPULATION N°8

ENTHALPIE DE RÉACTIONS ACIDE-BASE PAR LA MÉTHODE DES MÉLANGES

Avertissement : Ce T.P. n'est vraiment intéressant que si l'on étudie les deux acides ! Vous devez donc étudier les deux acides.

1. PRINCIPE

Le calorimètre contient au départ la solution acide. On y ajoute une quantité de solution basique en léger excès.

Données expérimentales à relever pendant l'expérience :

capacité thermique du calorimètre (pyrex)	C =		u(C) =	
capacité thermique massique de la solution acide	c_a =		u(c_a) =	
masse d'acide initialement présente dans le calorimètre	m_a =		u(m_a) =	
température initiale "stabilisée"	θ_a =		u(θ_a) =	
la masse de la solution basique introduite	m_b =		u(m_b) =	
capacité thermique massique de la solution basique	c_b =		u(c_b) =	
température finale "stabilisée" du système	θ_f =		u(θ_f) =	

- ☞ Écrire l'équation bilan de la réaction.
- ☞ Écrire l'équation calorimétrique en admettant que la transformation est adiabatique.
- ☞ En déduire l'expression littérale de l'enthalpie de réaction $\Delta_r H$.

Si l'on note n_a la quantité d'acide mise en jeu dans la réaction, l'enthalpie molaire de la réaction acide-base est donnée par : $\Delta_r H_m = \dfrac{\Delta_r H}{n_a}$

Remarque : Pour que la mesure ait un sens, il faut que les solutions soient suffisamment diluées pour que lors de leur mélange, les phénomènes de dilution ne mettent pas en jeu des énergies non négligeables devant l'enthalpie de réaction que l'on cherche à étudier.

4. MODE OPÉRATOIRE

4.1. Préparation de la mesure

Le vase calorimétrique doit être en Pyrex.

Acide chlorhydrique sur hydroxyde de sodium	**Acide orthophosphorique sur hydroxyde de sodium**
☞ Introduire 240 g d'acide chlorhydrique de concentration molaire 2 mol/L dans le calorimètre dont on a déterminé la capacité thermique C.	☞ Introduire 110 g de solution d'acide orthophosphorique de concentration molaire 1 mol/L dans le calorimètre dont on a déterminé la capacité thermique C.

- Mettre en place la sonde de température et son circuit électrique d'acquisition.
- Préparer :

Acide chlorhydrique sur hydroxyde de sodium	Acide orthophosphorique sur hydroxyde de sodium
260 g de solution de soude 2mol/L.	360 g de solution de soude 1 mol/L

- Mesurer au densimètre les densités d_a et d_b de chacune des deux solutions.

4.2. Acquisition des données

- Programmer une durée d'acquisition de 4 minutes.
- S'assurer de la stabilité relative de la température.
- Commencer l'acquisition.
- Introduire la soude au bout de 1 à 2 minutes.
- A la fin de l'acquisition, enregistrer votre travail.

5. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

5.1. Graphe

- Tracer la courbe de la température en fonction du temps.

5.2. Calculs

- A partir de l'équation calorimétrique, calculer la quantité de chaleur $\Delta_r H$. mise en jeu dans cette réaction.

Pour cela, on pourra assimiler les capacités thermiques des solutions utilisées à celles de l'eau :

$$c_1 \approx c_2 \approx c_{eau} \quad \text{avec} \quad c_{eau} = 4{,}186 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$$

- Calculer les quantités de matière utilisées en utilisant les relations :

$$n = c\,V \text{ où } \qquad V = \frac{m}{\rho_{eau} \cdot d}$$

- Vérifier que l'on a bien excès de soude :

Acide chlorhydrique sur hydroxyde de sodium	Acide orthophosphorique sur hydroxyde de sodium
$n_b > n_a$	$n_b > 3 \times n_a$

- Calculer alors l'enthalpie molaire des réactions.

5.3. Conclusion

- Comparer les résultats obtenus pour les deux acides étudiés.
- Que peut-on en conclure ?

MANIPULATION N°9

ENTHALPIE DE LA RÉACTION DU ZINC SUR LE SULFATE DE CUIVRE PAR LA MÉTHODE DES MÉLANGES

1. PRINCIPE

Le calorimètre contenant une solution de sulfate de cuivre, on y introduit une quantité connue de poudre de zinc.

Données expérimentales à relever pendant l'expérience :

capacité thermique du calorimètre (pyrex)	C =		u(C) =	
capacité thermique massique de la solution	c_A =		u(c_A) =	
masse de la solution de sulfate de cuivre présente dans le calorimètre	m_A =		u(m_A) =	
température initiale "stabilisée"	θ_a =		u(θ_a) =	
masse de zinc que l'on introduit	m_b =		u(m_b) =	
capacité thermique massique des deux métaux zinc et cuivre : $c_{Zn} \approx c_{Cu} \approx 392$ J.kg^{-1}.K^{-1}	c_b =		u(c_b) =	
température initiale du zinc	θ_b =		u(θ_b) =	
température finale "stabilisée" du système	θ_f =		u(θ_f) =	

☞ Écrire l'équation bilan de la réaction.

☞ Écrire l'équation calorimétrique en admettant que la transformation est adiabatique et en notant $\Delta_r H$ l'enthalpie de la réaction.

Remarque : Dans cette relation, on pourra faire l'approximation que la masse de cuivre formé est peut différente de la masse de zinc qui réagit.
A cela, on peut apporter deux arguments :

- Leurs masses molaires voisines (M_{Cu} = 63,5 g.mol^{-1} et M_{Zn} = 65,4 g.mol^{-1})
- La réaction se fait mole pour mole.

2. MODE OPÉRATOIRE

2.1. Préparation de la mesure

Le vase calorimétrique doit être en Pyrex.

☞ Introduire 500 g d'une solution de sulfate de cuivre de concentration molaire c_M = 0,2 mol/L dans le calorimètre dont on a déterminé la capacité thermique C.

☞ Mettre en place la sonde de température et son circuit électrique d'acquisition.

☞ Pesez une masse m_b, de zinc en poudre, de l'ordre de 4 à 5 g. Effectuer la pesée au décigramme près.

☞ Mesurer au densimètre la densité d de la solution de sulfate de cuivre.

☞ Relever la température ambiante θ_{amb}.

2.2. Acquisition des données

☞ programmer une durée d'acquisition de **15 minutes**.

☞ S'assurer de la stabilité relative de la température

☞ Commencer l'acquisition

☞ Introduire **progressivement** le zinc au bout de 1 à 2 minutes.

☞ A la fin de l'acquisition, penser à enregistrer votre travail.

3. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

3.1. Graphe

☞ Tracer la courbe de la température en fonction du temps.

3.2. Calculs

☞ A partir de l'équation calorimétrique, calculer l'enthalpie de la réaction $\Delta_r H$.

On pourra assimiler la capacité thermique de la solution à celle de l'eau

$$c_a \approx c_{eau} \qquad \text{avec} \quad c_{eau} = 4{,}186 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$$

☞ Calculer alors l'enthalpie **molaire** de la réaction :

$$\Delta_r H_m = \frac{\Delta_r H}{n}$$

☞ Quelle quantité de matière *n* faut-il utiliser ?

3.3. Conclusion

☞ **Exprimer le résultat final de votre mesure.**

☞ La valeur de $\Delta_r H_m$ fournie par des tables est de -211,6 kJ.mol^{-1}.

☞ Comparer la avec votre résultat. Qu'observe-t-on ?

☞ Quelle peut en être la cause expérimentale ?

MANIPULATION N°10

ENTHALPIES DE RÉACTIONS ACIDE-BASE : DOSAGES CALORIMÉTRIQUES

Dans ce TP on utilise une méthode calorimétrique[7] pour doser une solution d'acide chlorhydrique et une solution d'acide orthophosphorique par une solution d'hydroxyde de sodium.
Vous traiterez donc les deux acides successivement.

1. PRINCIPE

Le calorimètre contient la prise d'essai *E* de solution acide additionnée d'eau. On verse progressivement la solution basique par fractions égales et on relève la température θ après chaque addition jusqu'à ce que la température soit parfaitement stable.

Si θ_a représente la température initiale, chaque écart de température ($\theta - \theta_a$) est proportionnel à la quantité de chaleur dégagée par la réaction de la base sur l'acide, donc à l'enthalpie de la réaction.

Données expérimentales à relever pendant l'expérience :

capacité thermique du calorimètre (pyrex)	C =		u(C) =	
capacité thermique massique de la solution présente dans le calorimètre	c =		u(c) =	
masse de la solution d'acide et d'eau initialement présente dans le calorimètre	m_A =		u(m_A) =	
température initiale "stabilisée"	θ_a =		u(θ_a) =	
masse de solution de soude versée	m_b =		u(m_b) =	
température atteinte et "stabilisée" lorsque l'on a versé m_b	θ_f =		u(θ_f) =	

☞ Écrire l'équation bilan de la réaction.

☞ Écrire l'équation calorimétrique en admettant que la transformation est adiabatique.

☞ En déduire l'expression littérale de l'enthalpie de la réaction $\Delta_r H$.

[7] : En tant que méthode de dosage, la méthode calorimétrique est rarement pratiquée. En effet, les méthodes pH-métriques et conductimétriques permettent plus facilement d'effectuer des titrages. Cependant, la méthode calorimétrique présente l'intérêt de permettre, non seulement la mise en évidence, mais aussi le dosage de fonctions acides très faibles quand la pH-métrie est limitée dans ce domaine et la conductimétrie parfois possible.

2. MODE OPÉRATOIRE

2.1. Préparation de la mesure

Le vase calorimétrique doit être en Pyrex.

Acide chlorhydrique	Acide orthophosphorique
☞ Introduire la prise d'essai E = 100 cm³ de solution d'acide chlorhydrique de concentration molaire $c_a \approx 1$ mol/L dans le calorimètre dont on a déterminé la capacité thermique C. ☞ Ajouter 350 g d'eau.	☞ Introduire la prise d'essai E = 50 cm³ de solution d'acide orthophosphorique de concentration molaire $c_a \approx 1$ mol/L dans le calorimètre dont on a déterminé la capacité thermique C. ☞ Ajouter 350 g d'eau.

☞ Mettre en place la sonde de température et son circuit électrique d'acquisition.

☞ Préparer la burette contenant la soude

Acide chlorhydrique	Acide orthophosphorique
☞ De concentration c_b = 1 mol.L^{-1}	☞ De concentration c_b = 2 mol.L^{-1}

☞ Mesurer au densimètre les densités d_a de la solution d'acide et d_b de la solution de soude.

2.2. Acquisition des données

L'acquisition se fait *en fonction du volume de soude introduit au clavier.*

☞ Noter V le volume de soude ajoutée.

☞ Rechercher les valeurs des volumes maxima à programmer.

☞ S'assurer de la stabilité relative de la température initiale θ_a.

☞ Effectuer une première acquisition pour la valeur V = 0.

☞ Faire couler la solution de soude dans le calorimètre par petites fractions égales entre elles de 4 cm³. Après chaque addition de soude, attendre que la température θ se stabilise. Noter alors au clavier la valeur du volume versé V et effectuer l'acquisition de ce point de mesure.

☞ Continuer l'addition de soude jusqu'à ce qu'elle ne provoque plus aucune élévation de température.

☞ Quand l'acquisition est terminée, enregistrer votre travail.

3. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

3.1. Calculs préliminaires

La masse m_a de solution présente initialement dans le calorimètre est la somme de la masse de la solution d'acide et de la masse d'eau ajoutée.

Calcul de la masse m_a contenue dans le calorimètre

☞ En utilisant la mesure de la densité de la solution d'acide, calculer la masse de solution d'acide. On prendra $\rho_{eau} = 10^3$ kg.m^{-3}.

☞ En déduire la masse m_a de solution contenue initialement dans le calorimètre.

Calcul de la masse de soude en fonction du volume x

☞ Pour chaque valeur de V calculer la masse m de soude introduite. Comme ci-dessus, on utilisera la mesure de la densité de la solution de soude.

☞ Pour ce qui est de sa capacité thermique massique, on assimilera celle du mélange obtenu dans le calorimètre à celle de l'eau :

$$c_{eau} = 4{,}186 \times 10^3 \text{ J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$$

Calcul des quantités de chaleur

☞ Pour chaque valeur de V, en utilisant l'équation calorimétrique, calculer la quantité de chaleur $\Delta_r H$.

☞ **Dresser un tableau complet et récapitulatif des mesures et calculs.**

3.2. Détermination du ou des points d'équivalence

☞ Tracer la courbe $\Delta_r H = f(V)$.

☞ Sur la courbe, déterminer le volume à l'équivalence :

- ▫ Pour l'acide chlorhydrique :

$$x_E = \ldots$$

- ▫ Pour l'acide orthophosphorique :

$$x_{E1} = \ldots \qquad x_{E2} = \ldots \qquad x_{E3} = \ldots$$

a. Calcul de la concentration molaire de l'acide

☞ Calculer la concentration molaire de la solution acide connaissant celle de la soude.

3.3. Calcul de l'enthalpie de réaction

Acide chlorhydrique	**Acide orthophosphorique**
La variation d'enthalpie molaire de la réaction de la soude sur l'acide chlorhydrique s'exprime par $\Delta_r H_m = \frac{\Delta_r H_E}{n}$ ☞ Connaissant le volume à l'équivalence, relever la quantité de chaleur $\Delta_r H_E$ correspondante. ☞ La réaction a porté sur n mole d'acide : déterminer n. ☞ En déduire la variation d'enthalpie molaire de la réaction $\Delta_r H_m$.	La réaction s'est faite en trois étapes successives. Relever les quantités de chaleur $\Delta_r H_{E1}$, $\Delta_r H_{E2}$ et $\Delta_r H_{E3}$ correspondante aux trois volumes équivalents. Calculer les trois variations d'enthalpies molaires : $\Delta_r H_1 = \frac{\Delta_r H_{E1}}{n}$ $\Delta_r H_2 = \frac{\Delta_r H_{E2} - \Delta_r H_{E1}}{n}$ $\Delta_r H_3 = \frac{\Delta_r H_{E3} - \Delta_r H_{E2}}{n}$

3.4. Conclusion

☞ Que peut-on dire des courbes obtenues ?

☞ Quelle autre méthode de dosage donne des courbes de forme analogue ?

☞ Quel est l'intérêt des courbes de ce type ?

☞ Comparer les résultats obtenus à ceux que donnait la mesure des enthalpies de réaction par la méthode des mélanges.

TP N°12

Étude des isothermes d'un corps pur : l'hexafluorure de soufre.

TRACÉ DES ISOTHERMES D'UN CORPS PUR

Le but de la manipulation est de tracer, dans un diagramme de Clapeyron (pression en fonction du volume), un réseau d'isothermes d'un corps pur de masse constante *m*.

C'est l'occasion de constater la différence de comportement d'un corps pur suivant que la température soit inférieure ou supérieure à la température critique T_c.

Le fluide étudié est de l'hexafluorure de soufre (SF_6). Il est choisi en raison de ses paramètres critiques, faciles à atteindre :

- température critique : $\theta_c = 45{,}5$ °C
- pression critique : $p_c \approx 37{,}5$ bar

1. MONTAGE

1.1. Compression du fluide

L'appareil comprend une éprouvette en verre épais et résistant dans laquelle on comprime le fluide à étudier. Elle est fixée dans sa partie inférieure à une chambre de pression en acier inoxydable contenant du mercure.

On comprime le gaz en jouant sur la rotation d'un volant qui, par l'intermédiaire d'un piston, agit sur le mercure qui transmet la compression au fluide.

La marge de manœuvre du dispositif est de 0 à plus de 45 bars.

*Il ne faudra **jamais** dépasser P_{max} = 45 bar.*

En tournant le volant, on fait monter le mercure dans l'éprouvette qui est graduée de 0,05 cm^3 en 0,05 cm^3 sur 4 cm^3. La pression est lue sur le manomètre.

1.2. Transformation isotherme

Chaque isotherme doit, par définition, être tracée à température constante. Pour cela, l'éprouvette de verre est thermostatée de l'extérieur.

Dans la jaquette qui entoure l'éprouvette, on assure donc une circulation d'eau à *température constante*. Pour cela, les orifices de la jaquette sont convenablement reliés à la cuve thermostatique munie d'une pompe.

Pour assurer une parfaite sécurité :

La jaquette doit être remplie d'eau avant la mise en pression du fluide.

La température est lue sur un thermomètre placé dans la jaquette thermostatée.

2. MESURES

2.1. Ordre de l'acquisition des isothermes

Pour gagner du temps, effectuer les mesures dans l'ordre des températures croissantes :

- Première isotherme à 10°C par exemple ;
- Seconde isotherme à 20°C ;
- etc.

On devra ainsi tracer au moins 6 isothermes jusqu'à la température de 50°C ($\theta > \theta_c$).

2.2. Relevé d'une isotherme

☞ A température constante, relever des couples de valeurs (p, V) en jouant sur la rotation du volant. Il faut atteindre des valeurs de volume suffisamment petites pour que tout le fluide soit liquide.

Précaution importante
Quand le fluide est à l'état liquide, surveiller attentivement le manomètre.
Le liquide étant quasiment incompressible, une faible diminution de volume provoque une forte augmentation de pression.
NE PAS DÉPASSER 45 BAR !!!

SÉCURITÉ
Après chaque manipulation, pensez à ramener le gaz à sa pression minimale (mercure au bas de l'éprouvette).

2.3. Observations au cours de l'expérience

☞ Observer l'aspect du ménisque de l'interface SF_6 liquide SF_6 vapeur.

☞ Repérer le volume de vaporisation V_v lorsque la première goutte de liquide apparaît.

☞ Repérer le volume de liquéfaction V_L lorsque la dernière bulle de vapeur disparaît.

Vous résumerez ces situations en dressant un tableau pour l'ensemble des observations :

θ (°C) = ... V_v = ... V_L = ...

☞ Pendant la phase de retour à la pression minimale, on en profitera pour observer le phénomène de vaporisation du liquide.

2.4. Utilisation de l'ordinateur pour le traitement des données

Le relevé des couples (p, V) pourra se faire à l'aide du logiciel Régressi-Windows.

Chaque isotherme donne lieu au remplissage d'une **Nouvelle Page** agrémentée d'un Commentaire sur la température de travail.

Pour visualiser l'ensemble des courbes, utiliser l'option du logiciel. On obtient ainsi un *réseau d'isothermes* que l'on exploite.

3. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

3.1. Tracé de la courbe de saturation

☞ Imprimer le réseau complet des isothermes (en format paysage par exemple).

☞ Tracer la courbe de rosée : (***tracé manuel***)
Il s'agit de relier entre eux les points correspondants à l'apparition de la première goutte de liquide lorsqu'on comprime le gaz qui devient alors une vapeur saturée.

☞ Tracer la courbe d'ébullition :
Il s'agit de relier entre eux les points correspondants à la disparition de la dernière bulle de vapeur lorsqu'on comprime le fluide.

☞ La courbe de saturation est constituée des deux parties précédentes reliées au point critique :
- La courbe de rosée,
- La courbe d'ébullition.

☞ Placer le point critique et relever ses coordonnées :

θ_c = ... p_c = ... V_c = ...

Questions :

☞ Les variables d'état p_c et θ_c peuvent-elles être considérées comme des caractéristiques du point critique du fluide étudié ? Pourquoi ?

☞ En est-il de même pour la variable d'état V_c ? Pourquoi ?

☞ Le volume massique v_c (rapport du volume sur la masse) serait-il une caractéristique du point critique ?

3.2. Étude des isothermes

① Faire un compte rendu des phénomènes observés pendant les mesures.

② Quelle est l'allure des isothermes ? A quoi correspond chacune des parties de chaque courbe (quand il y en a plusieurs) ?

③ On travaille désormais sur les parties des isothermes correspondant à l'état de vapeur.

- Tracer pour chaque température l'isotherme d'Amagat $pV = f(p)$ et extrapoler chacune de ces courbes à l'origine des pressions pour calculer la masse m de fluide.
- Le gaz doit alors avoir un comportement de gaz parfait, de sorte que :

$$m = \frac{pV}{RT} \cdot M \quad \text{où} \qquad M = 146 \text{ g.mol}^{-1}$$

- Dresser un tableau des résultats.
- Que peut-on dire des résultats obtenus ?
- Indiquez la valeur finale de $(m \pm \Delta m)$ que vous adopterez en justifiant votre choix. C'est cette valeur de m qui sera utilisée pour la suite.

④ Pour chaque température déterminer (si cela existe) :

- la pression de vapeur saturante p_{sat} ;
- le volume massique de la vapeur saturante : $v_v = \frac{V_v}{m}$
- le volume massique du liquide saturant : $v_L = \frac{V_L}{m}$
- Que peut-on dire de chacun des deux volumes massiques ?

⑤ Tracer la courbe d'ébullition $p_{sat} = f(\theta)$.

⑥ Tracer $\ln p_{sat} = f(1/T)$.
Que peut-on dire de cette la courbe ?
Est-il possible d'en déduire une relation entre p_{sat} et T ?

⑦ Déterminer la pente dp_{sat}/dT à partir de la courbe d'ébullition $p_{sat} = f(T)$ aux températures pour lesquelles les mesures ont été effectuées. En utilisant la relation de Clapeyron donnée ci-dessous, déduire la chaleur latente de vaporisation L_v de l'hexafluorure de soufre.

$$\boxed{L_v = T \cdot (v_v - v_L) \cdot \frac{dp_{sat}}{dT}}$$

Tracer la courbe $L_v = f(T)$.

Que peut-on dire de la variation de la chaleur latente en fonction de la température ?

Que se passe-t-il lorsque la température θ tend vers la température critique θ_c ?

TP N°13

Pression de vapeur saturante : tracé et étude de la courbe de saturation.

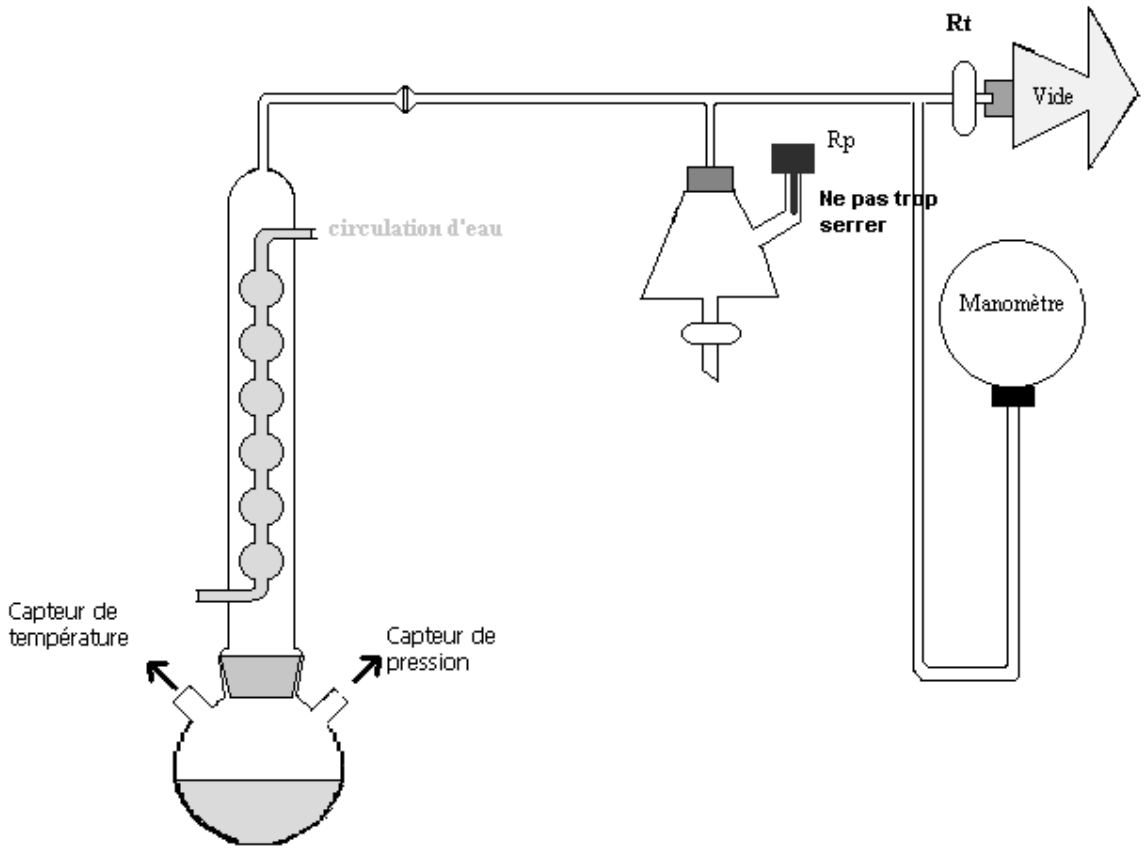
PRESSION DE VAPEUR SATURANTE D'UN LIQUIDE

1. PRINCIPE

Il s'agit de tracer la courbe de pression de vapeur saturante ou courbe d'ébullition d'un liquide $p = f(\theta)$, où θ désigne la température.
Partant d'une pression aussi faible que possible, on réalisera une série d'équilibres liquide vapeur à des pressions croissantes. Lorsque chaque équilibre sera bien établi, on relèvera le couple de valeurs pression température correspondant.
L'ensemble de ces couples sera acquis par l'intermédiaire de l'interface ORPHY-G.T.I : on programmera une acquisition en XY avec la *température en abscisse et la pression en ordonnées.*

2. MANIPULATION

2.1. Dispositif expérimental

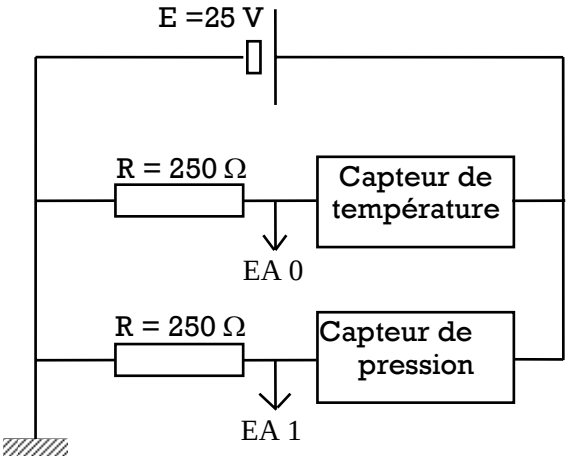


2.2. Préparation

Introduire environ 150 cm^3 de liquide dans le tricol en veillant à ce que la sonde de température soit à environ un centimètre au-dessus de la surface libre du liquide. Ajouter quelques grains de ponce sulfurique. Bien replacer le tricol (graisse silicone).

2.3. Montage et étalonnage des capteurs

Schéma de montage électrique des capteurs de température et de pression :



Programmer une acquisition en XY :

Suivant OX (Voie A), on captera la tension image de la température.
Suivant OY (Voie B), on captera la tension image de la pression.

Étalonnage des deux sondes :

☞ Pour la *sonde de température* :

Il s'agit d'une sonde Pt 100 prévue pour fonctionner entre 0°C et 100°C. On procédera à son étalonnage de façon manuelle :

- 1 V → 0°C
- 5 V → 100°C

☞ Pour la *sonde de pression* :

Le constructeur annonce qu'elle fonctionne en pression relative entre -1 et 0 bar. Nous pouvons donc considérer qu'elle permettra des mesures entre 0 et 1 bar en pression absolue.

Pour son étalonnage, nous prendrons les deux pressions extrêmes réalisables :

- la pression atmosphérique étant la plus forte ;
- la plus faible étant celle réalisée par le dispositif de pompage.

Réalisation de l'étalonnage :

1- Étalonnage de la pression maximale p_{max} :

- Lire sur un baromètre la pression atmosphérique du jour : *H* en mm Hg.
- La pression à l'intérieur du dispositif étant égale à la pression atmosphérique *H* en mm Hg. Convertir cette valeur en pascals pour obtenir p_{max} et étalonner le premier point.

Il suffit de donner au logiciel la valeur de p_{max} en **pascals**.

2- Étalonnage de la pression minimale p_{min} :

- Vérifier que le robinet Rt (figure 1), reliant le montage à la trompe à eau, est fermé. Mettre alors la trompe à eau en marche en ouvrant le robinet d'eau au maximum.

- Ouvrir doucement le robinet Rt. La pression baisse dans le montage l'indication du vacuomètre doit au moins atteindre 720 mm Hg.
- Fermer alors le robinet Rt. La dénivellation dans le manomètre doit rester constante ; l'inverse indique la présence d'une fuite dans le montage. Chercher à la détecter sans jamais serrer à fond les joints. En cas d'impossibilité, on peut compenser les fuites en réglant l'ouverture du robinet Rt de façon à stabiliser la position de l'aiguille du vacuomètre.
- Lire l'indication du vacuomètre. Par différence, en déduire la pression régnant dans le montage ($\Delta p = patm - p$) et entrez dans le logiciel le second point d'étalonnage $p_{\min.}$ (en **pascals**).

2.4. Mesures et acquisitions

☞ Mettre en marche :
- la circulation d'eau dans le doigt réfrigérant ;
- la trompe à eau, le robinet Rt étant bien fermé.

☞ Ouvrir le robinet Rt de façon à ce que la dépression indiquée par le manomètre soit maximale (≈720 mm Hg). Vérifier l'étanchéité du montage comme précédemment.

Si l'eau ne bout pas quand la pression est minimale, il faut la chauffer légèrement. L'ébullition étant atteinte, s'assurer de la stabilité des deux indications affichées à l'écran (pression et température constantes (équilibre du système). Nous pouvons alors *acquérir ce point de mesure en appuyant sur la barre d'espacement du clavier.*

Augmenter très légèrement la pression dans l'enceinte en faisant pénétrer un peu d'air à l'aide du robinet Rp. Dès que le liquide bout à nouveau et que les deux indications sont stabilisées, faire une nouvelle acquisition.

☞ Réaliser ainsi une quinzaine de mesures régulièrement réparties jusqu'à revenir à la pression atmosphérique.

Conseil : Procéder toujours dans le sens des températures croissantes et évaluer l'état d'ébullition de façon identique à chaque fois.

☞ En fin de manipulation, fermer le robinet Rt avant d'arrêter la trompe à eau.
☞ Quand l'acquisition est terminée, *enregistrer immédiatement les données*.

3. EXPLOITATION DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

3.1. Visualisation du graphe p = f(θ)

☞ *Décrire* la courbe obtenue. Il s'agit de la *courbe d'ébullition* du liquide étudié.

3.2. Vérification de la formule de Rankine

Le but de cette exploitation est de confronter vos résultats expérimentaux avec un modèle empirique qui doit refléter le mieux possible le phénomène étudié.

☞ Créer deux nouvelles variables :
- $\ln p$
- $x = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{(\theta + 273{,}15)}$

☞ Visualiser le graphe $\ln p = f(x) = f(1/T)$

☞ Donner l'équation de la droite de régression sous la forme : $\ln p = \dfrac{a}{T} + b$. C'est la formule de Rankine.

☞ Commenter le résultat.

3.3. Comparaison des enthalpies

a. Constante de l'équilibre liquide - vapeur

L'équilibre peut s'écrire : $X_{liq} \Leftrightarrow X_{vap}$ avec $K = \frac{p}{p_o \cdot a_{H_2O}} = p$ (bar)

- On peut utiliser la relation de Van't Hoff pour exprimer la quantité :

$$\ln K = f(\frac{1}{T})$$

La relation de Van't Hoff s'écrit :

$$\frac{d(\ln K)}{dT} = \frac{\Delta H_m}{R \cdot T^2}$$ (ici $K = p$ en bar)

où :

- K est la constante d'équilibre.
- ΔH_m est l'enthalpie de la vaporisation du liquide rapportée à une mole.

b. Détermination de l'enthalpie par la formule de Rankine

- ☞ À partir de l'expression ci-dessus et de la formule de Rankine établie au § 3.2., montrer que $\Delta H_m = -a\ R$.
- ☞ Calculer cette valeur.

c. Détermination de l'enthalpie à l'aide des mesures "effectives"

- ☞ Pour chaque pression mesurée, et en utilisant la relation de Van't Hoff, calculer ΔH_m. Vous utiliserez pour cela le logiciel de traitement des données en créant les variables nécessaires.
- ☞ Peut-on considérer l'enthalpie comme indépendante de la température sur l'intervalle de température étudié ?
- ☞ Tracer ΔH_m en fonction de la température peut s'avérer utile !
- ☞ Quoiqu'il en soit, donner la valeur moyenne de ΔH_m et la comparer avec la valeur trouvée précédemment.
- ☞ Déduire de la valeur moyenne de $\overline{\Delta H_m}$ la chaleur latente massique moyenne de vaporisation $\Delta h = L_v$.

d. Conclusion

Le modèle empirique de Rankine est-il excellent, approché ou faut-il le rejeter ? Connaissez vous d'autres modèles expérimentaux ?

3.4. Formule de Clapeyron

- ☞ Pour chacun des points étudiés, calculer la chaleur de vaporisation L_v à partir de la relation de Clapeyron en assimilant la vapeur à un gaz parfait :

$$L_v = T \cdot (v_v - v_l)\frac{dp}{dT}$$

où :

- v_v est le volume massique de la vapeur ;
- v_l est le volume massique du liquide.

Si l'on fait l'approximation que : $v_v >> v_l$, la relation de Clapeyron s'écrit alors :

$$L_v = T \cdot v_v \cdot \frac{dp}{dT}$$

Notons de plus que l'équation d'état des gaz parfaits rapportée à l'unité de masse s'écrit :

$v_v = \dfrac{RT}{Mp}$ où M est la masse molaire du corps étudié en unité SI.

☞ Compléter le tableau suivant :

θ (°C)	T (K)	p (Pa)	$dp/d\theta$ (Pa.°C^{-1})	v_v (m^3.kg^{-1})	L_v (J.kg^{-1})

☞ Que peut-on conclure des résultats obtenus ?

☞ Que devient la formule de Clapeyron lorsqu'on remplace dp/dT par son expression issue du modèle de Rankine ?

☞ Ce résultat confirme-t-il la conclusion donnée au paragraphe 3.3.d. ?

☞ La Table de la vapeur d'eau donnée en annexe permet d'éviter les approximations. Comparer vos résultats à ceux de la table : pour le volume massique de la vapeur d'une part et pour la chaleur latente de vaporisation d'autre part.

☞ La vapeur d'eau peut-elle être raisonnablement assimilée à un gaz parfait ?

TABLES THERMODYNAMIQUES DE LA VAPEUR D'EAU
(La chaleur latente de vaporisation y est notée h_{fg}.)

Vapeur saturée : table de température

		Volume massique		Énergie interne			Enthalpie			Entropie		
		m^3/kg		kJ/kg			kJ/kg			kJ/kg.K		
Temp.	Pression.	Liquide	Vapeur	Liquide		Vapeur	Liquide		Vapeur	Liquide		Vapeur
°C	kPa	saturée	saturée	Saturé	Vaporisation	Saturée.	Saturé.	Vaporisation	Saturée	Saturé	Vaporisation	Saturée
θ	p	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	.245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	.2966	8.3706	8.6672
25	1169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79'	2430.5	2556.3	.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251:13	2358.5	2609.6	.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	1407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2281.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
100	101.35	0.001 044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	120.82	0.001 048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	147.27	0.001 052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	169.06	0.001 056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	198.53	0.001 060	0.8919	501.50	2025.8	2529.3	50171	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	232.1	0.001 065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	270.1	0.001 070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	313.0	0.001 075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	361.3	0.001 080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	415.4	0.001 085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	475.8	0.001 091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379

TP N°14

Température et pression dans une cocotte minute

TEMPÉRATURE ET PRESSION DANS UNE COCOTTE MINUTE

Le but de la manipulation consiste à étudier las variations de pression et de température de la vapeur contenue dans une cocotte minute au cours du chauffage et du refroidissement.
Une sonde de température et un capteur de pression sont placés dans la vapeur.
L'acquisition des données est réalisée par le biais de l'interface Orphy- GTI.

1. Préparation de la manipulation

☞ Introduire environ 1,5 L d'eau **chaude** dans la cocotte minute.

2. Préparation de l'acquisition

Abscisse : temps
Voie : A et B

Voie A : EA2 (Prise F)
Gamme : ±5V
Nom : p Unité : Pa
Étalonnage manuel
U = 0 V p = 0
U = 5 V p = 250 000
Tension +

Voie B : EA7
Gamme : ±2V
Nom : θ Unité : °C
Étalonnage manuel
U = 0 V θ = 0
U = 2 V θ = 205
Tension +

Enregistre : durée : environ 2000 s avec une mesure toutes les 10 secondes.
Synchronisation : Clavier

3. Chauffage

1. La soupape tournante n'est pas utilisée. Elle est remplacée par un tuyau plastique muni d'un robinet. Le robinet étant ouvert, mettre le chauffage et enclencher l'acquisition.
2. Quand la température est stabilisée à 100°C, fermer le robinet.
3. Quand la soupape de sécurité fonctionne depuis quelques minutes, arrêter l'acquisition et enregistrer le travail dans un fichier.

4. Refroidissement

La cocotte est placée sur la paillasse. Relancer une acquisition pendant 2000 s. Pour gagner un peu de temps, vous pourrez arrêter l'acquisition dès que la température repasse en dessous de 80°C.

5. Exploitation des résultats

1. Pour le chauffage, tracer sur le même graphe les courbes $p = f(t)$ et $\theta = f(t)$.

☞ Commentez-en les différentes parties.

2. Pour le refroidissement, tracer $p = f(\theta)$.

3. Vérification du modèle de Duperay : $p = \left(\frac{\theta}{100}\right)^4$, avec p en bar.

☞ Pour cela, effectuer une modélisation de la courbe de refroidissement entre 100°C et 118°C en proposant une formule de la forme : $p = 10^5 \left(\frac{\theta}{100}\right)^n$.

☞ Commentez !

4. Vérification du modèle de Rankine :

☞ Créer deux nouvelles variables : ln p et $x = 1/T$.

☞ Visualiser le graphe ln $p = f(x)$

☞ Donner l'équation de la droite de régression : c'est la formule de Rankine.

☞ Commentez le résultat et comparer au modèle de Duperay.

5. Calcul de la chaleur latente de vaporisation de l'eau :
La formule de Clapeyron permet d'établir, moyennant certaines approximations que :

$$L_{vap} = T \cdot v \cdot \frac{dp}{dT}$$

Où v représente le volume massique de la vapeur sèche en $m^3.kg^{-1}$ avec $v = \frac{RT}{Mp}$ où M est la masse molaire de l'eau.

☞ Calculer L_{vap} vers 110°C.

☞ Comparer avec le résultat donné dans les tables de la vapeur d'eau page 82.

☞ L'approximation de la vapeur comme gaz parfait est-elle justifiée ?

TP N°15

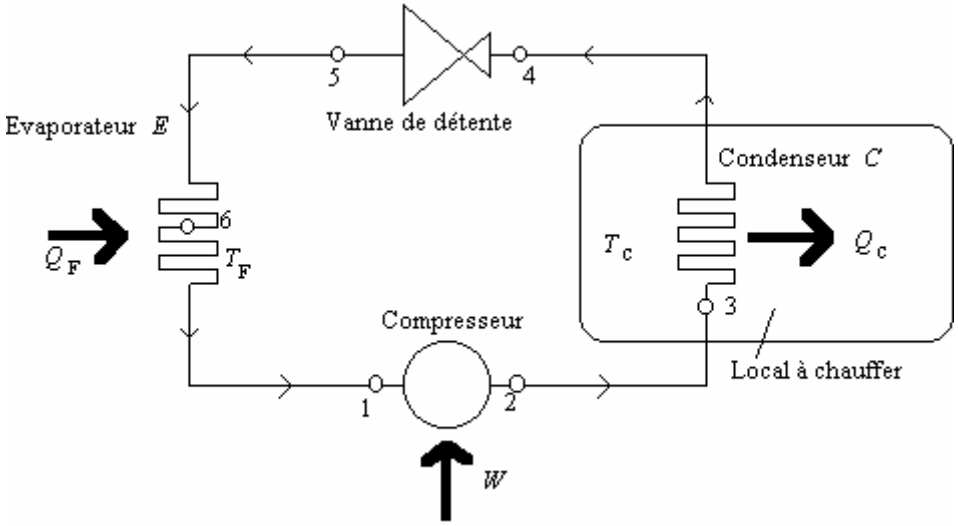
Étude d'une pompe à chaleur

ÉTUDE D'UNE POMPE A CHALEUR

1. FONCTIONNEMENT THÉORIQUE

Une pompe à chaleur est une machine thermique dans laquelle le fluide qui subit une transformation cyclique est du fréon R12 (CF_2Cl_2).

1.1. Schéma de principe



1.2. Description du cycle

- Le fluide caloporteur sort à l'état gazeux du serpentin de l'évaporateur *E* (pression p_D et température T_F de la source froide) ⑥.
- Il passe alors dans le compresseur ① qui le comprime à la pression p_c. Cette compression rapide est isentropique (adiabatique) : le fréon gazeux s'échauffe②.
- Quand le fréon gazeux arrive dans le serpentin du condenseur *C*, il se refroidit jusqu'à la température T_C de la source chaude et se liquéfie sous la pression p_C ③.
- Il passe alors dans une vanne de détente (capillaire) ④ qui le ramène à la pression p_D ⑤. La détente est isenthalpique.
- A l'arrivée dans le serpentin de l'évaporateur *E*, le fluide se vaporise sous la pression p_D et à la température T_F de la source froide ⑥.

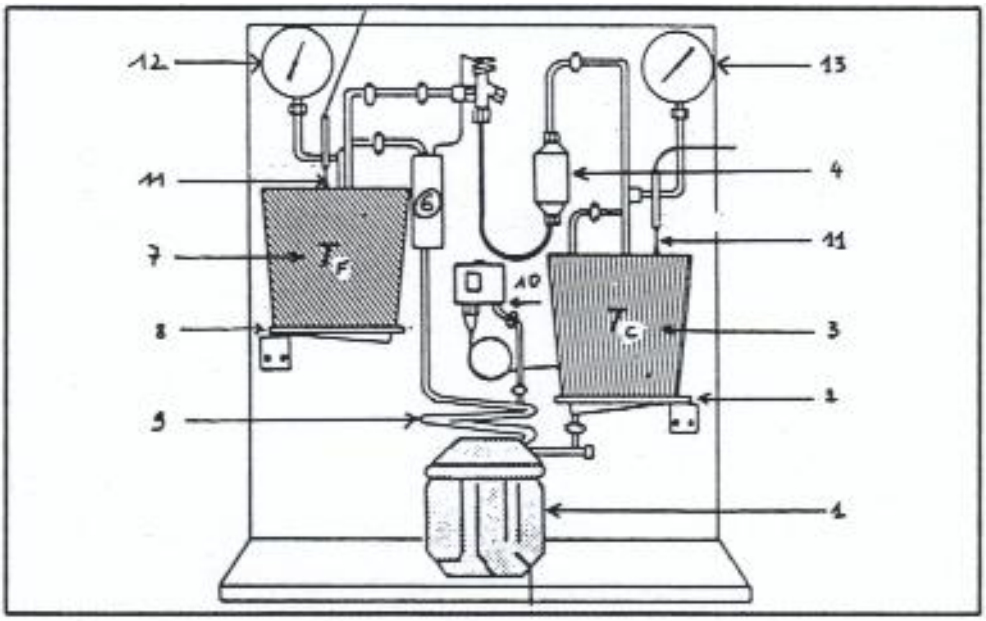
1.3. Bilan énergétique

Le fluide :

- reçoit le travail W du compresseur ;
- cède à la source chaude la chaleur Q_C dans le condenseur où il se liquéfie ;
- reçoit de la source froide la chaleur Q_F dans l'évaporateur pour se vaporiser.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

2.1. La pompe à chaleur



Légende :

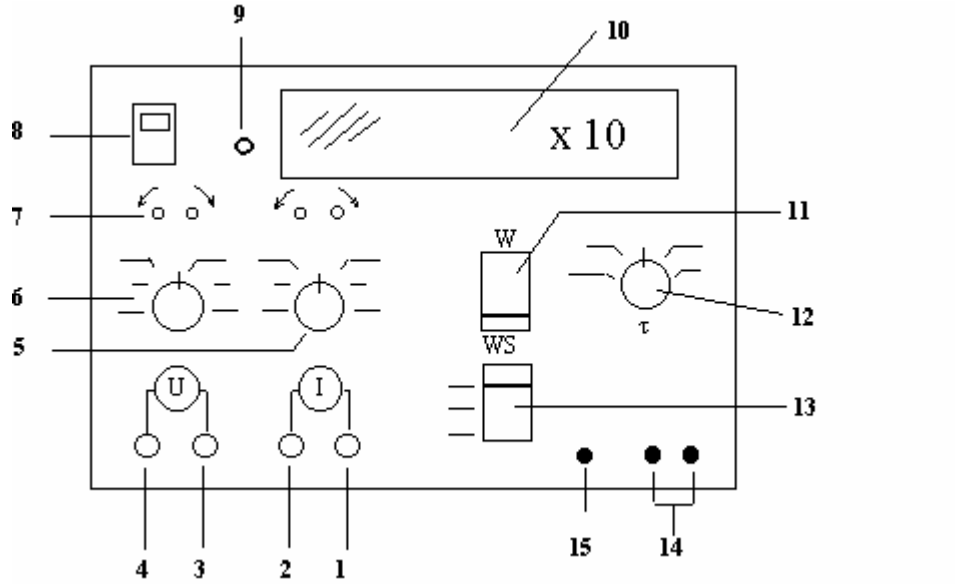
1. Compresseur.
2. Support pivotant du réservoir rouge d'eau de la source chaude.
3. Condenseur.
4. Épurateur : Filtre le fréon liquide des bulles de gaz qu'il contient.
5. Détendeur.
6. Capteur de température du détendeur avec isolation thermique.
7. Évaporateur.
8. Support pivotant du réservoir bleu d'eau de la source froide.
9. Serpentin qui empêche la transmission des vibrations du compresseur à l'ensemble du montage.
10. Pressostat : Arrête le compresseur quand la pression côté condenseur dépasse 16 bar.
11. Capteurs de température au niveau des tuyaux en cuivre du circuit.
12. Manomètre côté basse pression. Graduation intérieure pour la mesure des pressions (relatives) de -1 à +10 bar. Graduation extérieure de -60 à +45°C avec température du point de rosée du fréon R12 (les deux graduations centrales sont des échelles prévues pour d'autres fluides).
13. Manomètre côté haute pression. Graduation intérieure pour la mesure des pressions (relatives) de -1 à +30 bar. Graduation extérieure de -70 à +95°C avec température du point de rosée du fréon R12 (les deux graduations centrales sont des échelles prévues pour d'autres fluides).

2.2. La mesure du travail mis en jeu: le joule mètre / wattmètre

a. Principe

Utilisé en wattmètre, il indique la puissance électrique P_e consommée par le compresseur : les signaux de courant et de tension sont multipliés entre eux. Le résultat de l'opération est une tension $u_p(t)$ proportionnelle à la puissance instantanée. C'est la valeur moyenne qui est affichée.

Utilisé en joule mètre, il indique le travail électrique W_e consommé pendant la durée de fonctionnement t.



b. Schéma

c. Légende

1 - 2 - 3 - 4 - Bornes de raccordement au compresseur par l'intermédiaire d'une boite de raccordement : voir schéma de montage au § 3.5.

5 - Sélecteur de gamme de courant.

6 - Sélecteur de gamme de tension.

7 - Diodes lumineuses pour la visualisation de sous ou sur modulation des préamplis pour le courant et la tension, avec flèches de sens de rotation pour les sélecteurs de gamme **5** et **6**.

8 - Interrupteur avec voyant.

9- Bouton de remise à zéro (Reset) pour l'affichage des mesures de puissance (commutateur **11** sur la position "W".

10 - Afficheur à LED.

11 - Commutateur de fonction :

- Position supérieure "W" : affichage de la puissance P en watt.
- Position inférieure "WS" : affichage de l' énergie électrique E_e en watt-seconde ou joule.

12- Sélecteur de gamme pour le coefficient de temps de l'intégrateur.

13 - Commutateur de commande de l'intégrateur :

- "RUN" : mesure de l'énergie électrique
- "STOP" : interruption de la mesure avec blocage de l'affichage.
- "RESET" : remise à zéro de l'intégrateur et de l'affichage.

14 - Sortie analogique.

15 - Remise à zéro pour la sortie analogique.

3. MONTAGE ET RÉGLAGES

3.1. Alimentation du wattmètre

☞ Relier le wattmètre au secteur et le mettre sous tension.

3.2. Remplissage des sources de chaleur

☞ Enlever les réservoirs en faisant pivoter les supports.

☞ Les remplir avec 4 L d'eau mesurés à l'éprouvette.

☞ Remettre en place les réservoirs sur les supports.

3.3. Mise en place des sondes de température

☞ Vérifier la présence des deux sondes de température dans les sources froide et chaude.

☞ Les connecter à l'indicateur de température.

3.4. Réglage du wattmètre / joule mètre

Tourner les commutateurs **5** et **6** jusqu'aux positions 300 V et 3A.

Remise à zéro de l'affichage du joule mètre position "WS" : mesure de l'énergie électrique :

☞ Mettre le sélecteur de gamme 12 sur la position τ = 1 s.

☞ Placer le commutateur de fonction 11 sur "WS" et le commutateur de commande 13 de l'intégrateur sur "RESET", puis sur "RUN".

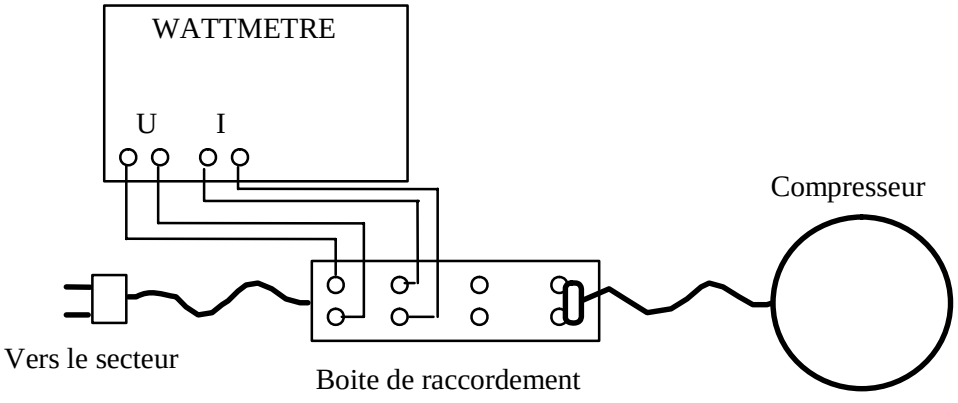
☞ Arrêter l'affichage numérique à l'aide du potentiomètre 9 et ne plus le bouger.

Réglage du *temps d'intégration* convenable pour la mesure :

☞ Remettre le commutateur de commande 13 sur "RESET".

☞ Régler le temps d'intégration τ à la valeur 10^3 s en utilisant le sélecteur de gamme 12.

3.5. Liaison électrique wattmètre / compresseur



Ne pas relier au secteur pour le moment : le compresseur commencerait à fonctionner

NE JAMAIS RELIER DIRECTEMENT LE COMPRESSEUR DE LA POMPE A CHALEUR AU SECTEUR !

3.6. Mise en marche des agitateurs

Mettre en marche les agitateurs dans les deux réservoirs d'eau.

4. ÉTUDE DE L'EFFICACITÉ DE LA POMPE A CHALEUR

On décide de faire des mesures avec la pompe à chaleur fonctionnant pendant une quinzaine de minutes. Pendant ce temps, vous relèverez, toutes les minutes :

- La température θ_F de l'eau de la source froide où se trouve le serpentin "évaporateur" ;
- La température θ_C de l'eau de la source chaude où se trouve le serpentin "condenseur" ;
- L'énergie électrique E_e et la puissance P_e consommées par le compresseur.

4.1. Températures initiales

☞ Relever les températures des deux réservoirs : elles doivent être sensiblement égales.

4.2. Mise en marche

☞ Relier la boite de raccordement au secteur et déclencher un chronomètre. Le compresseur commence à fonctionner.

☞ *Immédiatement*, mettre le commutateur de commande **13** du joule mètre sur "RUN" la mesure de l'énergie électrique consommée débute.

4.3. Tableau des mesures

☞ Toutes les minutes, relever θ_F, θ_C, E_e et P_e.

☞ Dresser un tableau des mesures.

☞ Que constate-t-on ?

☞ Au bout de quinze minutes, arrêter le fonctionnement de la pompe à chaleur en déconnectant la boite de raccordement du secteur.

4.4. Évolution de la température en fonction du temps

☞ Tracer sur un même graphe les deux courbes $\theta_F = f(t)$ et $\theta_C = f(t)$.

☞ Conclusion ?

4.5. Calcul de l'efficacité réelle η

On se propose de calculer l'efficacité réelle (ou indice de performance) pour chaque intervalle de temps Δt = 1 min.

A chaque instant, la quantité de chaleur dQ_C cédée par le fréon au réservoir d'eau chaude est opposée à la quantité de chaleur dQ reçue par l'eau :

$$dQ = m\, c_{eau}\, d\theta_C \qquad \text{avec} \quad m = 4 \text{ kg},\ c_{eau} = 4{,}18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Dans le même esprit, la puissance électrique apportée s'exprime par :

$$P_e = \frac{dE_e}{dt}$$

La puissance thermique reçus par la source chaude s'exprime par :

$$P_{th} = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = mc\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$$

L'efficacité réelle est donc le rapport :

$$\eta = \frac{P_{th}}{P_e}$$

☞ Créer les variables convenables.

☞ Dresser un tableau des résultats.

4.6. Évolution de l'efficacité η en fonction des températures

☞ Tracer la courbe $\eta = f(\theta_C - \theta_F)$.

☞ Conclure.

4.7. Comparaison de l'efficacité réelle η avec l'efficacité idéale η_{max}

Pour une pompe à chaleur fonctionnant de façon idéale, donc réversible, entre une source froide à la température T_F (en K) et une source chaude à la température T_C (en K), on aurait :

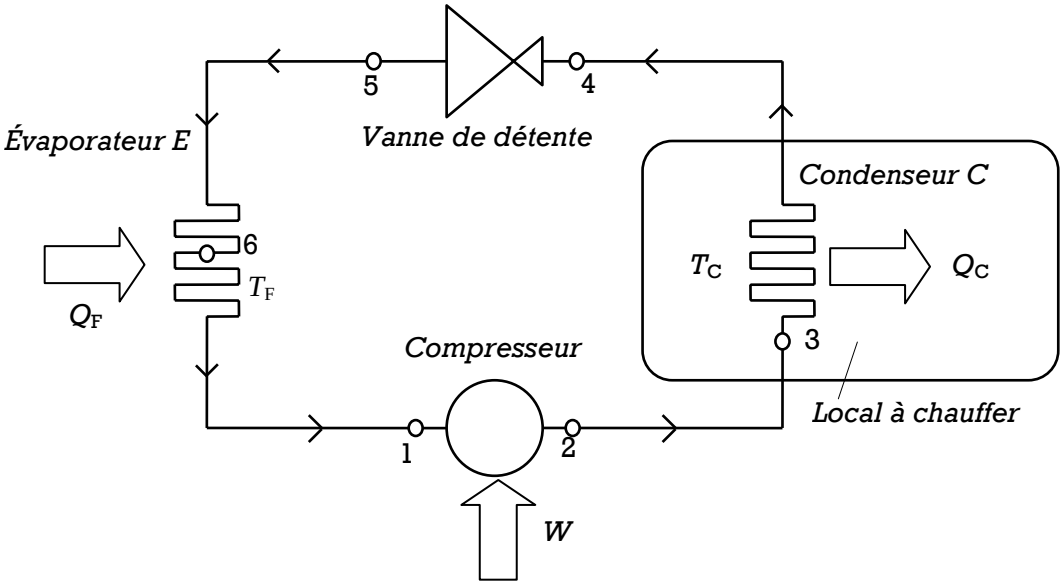
$$\eta_{max} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

☞ Dresser un tableau des valeurs et tracer la courbe correspondante, en la superposant à la courbe $\eta = f(\theta_C - \theta_F)$ du § 4.6.

☞ Conclure.

5. ETUDE DU FONCTIONNEMENT SUR LE DIAGRAMME DE MOLLIER

5.1. Rappel du fonctionnement de la pompe à chaleur



État 1 : Le fréon arrive à l'entrée du compresseur à l'état gazeux à la pression p_E et température θ_1.

État 2 : Il passe alors dans le compresseur qui le comprime à la pression p_C. Cette compression rapide est supposée adiabatique : le fréon gazeux s'échauffe jusqu'à la température θ_2.

État 3 : Dans le serpentin du condenseur C, le *fréon se refroidit jusqu'à la* température θ_C de la source chaude et commence à se liquéfier sous la pression p_C à la température θ_C.

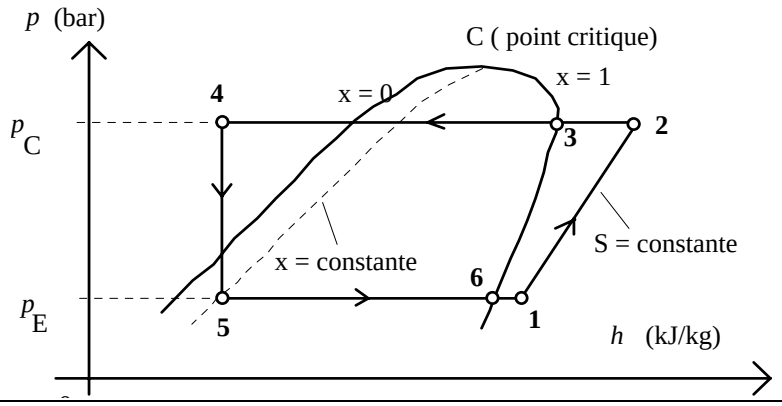
État 4 : Le fréon, sorti du condenseur à la température θ_C et à la pression p_C, se refroidit sur son trajet jusqu'au point 4 où il est à la température θ_4 tout en restant à la pression p_C.

État 5 : Dans une vanne de détente, il subit une détente isenthalpique qui le ramène à la pression p_E en subissant un début de vaporisation à la température θ_5.

État 6 : A l'arrivée dans l'évaporateur E, le fréon finit sa vaporisation sous la pression constante p_E et à la température θ_5. Au contact de la source froide, il se réchauffe jusqu'à la température $\theta_6 = \theta_F$.

Retour à l'état 1 : Entre la source froide et le compresseur, le gaz se réchauffe légèrement de θ_F à θ_1.

5.2. Représentation du cycle



5.3. Mesures à effectuer

Elles doivent être effectuées lorsque la pompe à chaleur fonctionne déjà depuis environ 15 minutes (tout de suite après l'étude du § 4).

Vous allez relever une série de températures. Ce ne seront pas exactement les températures du fréon dans les différents états précédemment décrits, car on ne peut pas introduire de capteurs à l'intérieur du circuit.

☞ Placer les sondes de température avec les tuyaux en cuivre aux différents points indiqués.

Aux points 1, 2, 4 et 5, il faut peut-être fixer des sondes thermométriques à l'aide de ruban adhésif de sorte que le contact thermique soit le meilleur possible.

☞ Relever, tant que faire se peut, simultanément :

- La pression p_E côté évaporateur sur le manomètre **13** et, sur le même manomètre, la température du point de rosée correspondant du fréon ($\theta_{eb/E}$) ;
- La pression p_C côté condenseur sur la manomètre **14** et, sur le même manomètre, la température du point de rosée correspondant du fréon (θ_{vC}).
- La température θ_1 à l'entrée du compresseur (point 1) ;
- La température θ_2 à la sortie du compresseur (point 2) ;
- La température θ_4 à l'entrée du détendeur (point 4) ;
- La température θ_5 à la sortie du détendeur (point 5) ;
- La température θ_C de la source chaude ;
- La température θ_F de la source froide ;

Attention, **les manomètres indiquent des pressions relatives** : il faut donc ajouter 1 bar à la lecture pour obtenir des pressions absolues.

5.4. Tracé du cycle sur le diagramme de Mollier et commentaires

Sur le diagramme fourni :

Point 1 : ☞ Placer le point 1 correspondant à la pression p_E et à la température θ_1 : il se trouve à l'intersection de la droite horizontale p_E = constante et de la courbe isotherme d'équation θ_1 = constante.

☞ Lire en abscisse l'enthalpie massique h_1 du gaz (ou utiliser la table fournie).

Point 2 : ☞ La compression étant supposée isentropique (adiabatique réversible), il se trouve à l'intersection de la droite horizontale correspondant à p_C = constante et de la courbe s = constante passant par le point 1.

☞ Sur le diagramme, lire la température θ'_2 et l'enthalpie massique h_2 correspondant au point 2.

☞ Comparer la température θ'_2 lue sur le diagramme et la température θ_2 relevées sur le tuyau en cuivre à la sortie du compresseur.

☞ Que constate-t-on ?

Point 3 : ☞ Dans le condenseur, le gaz se refroidit sous la pression constante p_C et va commencer à se liquéfier.

☞ Sur le diagramme, lire la température θ'_3 à laquelle le gaz commence à se liquéfier.

Point 4 : ☞ Dans le condenseur, la liquéfaction se poursuit jusqu'à être totale ; le liquide formé se refroidit jusqu'à la température θ_C de la source chaude ; il continue à se refroidir sur son trajet vers le détendeur jusqu'à la température θ_4 : il se trouve à l'intersection de la droite horizontale p_C = constante et de la courbe isotherme d'équation θ_4 = constante.

☞ Lire l'enthalpie massique h_4 du liquide avant sa détente.

Point 5 : ☞ La transformation 4 → 5 peut-être assimilée à une détente de Joule-Thomson. Le fluide suit alors une isenthalpique et le point 5 se trouve à l'intersection de la droite verticale h_4 = constante avec la droite horizontale p_E = constante.

☞ Lire la fraction massique x de vapeur qui s'est formée au cours de la détente.

☞ Lire sur le diagramme la température θ'_5 à laquelle se déroule la vaporisation.

☞ Comparer θ'_5 et θ_5.

Point 6 : ☞ Placer le point 6 auquel la vaporisation de termine sous la pression p_E et noter la température θ_6 correspondante.

☞ **Tracer le cycle.**

☞ **Dresser un tableau récapitulatif des mesures et des relevés sur le diagramme.**

Température de la source chaude : θ_C =
Température de la source froide : θ_F =

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
Températures mesurées	θ_1 =	θ_2 =		θ_4 =	θ_5 =	θ_6 =
Températures lues sur le diagramme		θ'_2 =	θ'_3 =		θ'_5 =	
Pression	p_E =	p_C =			p_E =	p_E =
Enthalpies massiques	h_1 =	h_2 =		h_4 =	h_5 =	
Titre					x =	

5.5. Observations à partir le cycle

☞ Comparer, respectivement, les températures des points de rosée lues sur les manomètres avec les températures θ_C et θ_F. Conclusion ?

☞ Comparer θ_1 avec θ_F et θ_4 avec θ_C. Qu'observe-t-on ?

☞ A quels moments les conversions d'énergies les plus importantes ont-elles lieu ?

5.6. Étude de l'efficacité

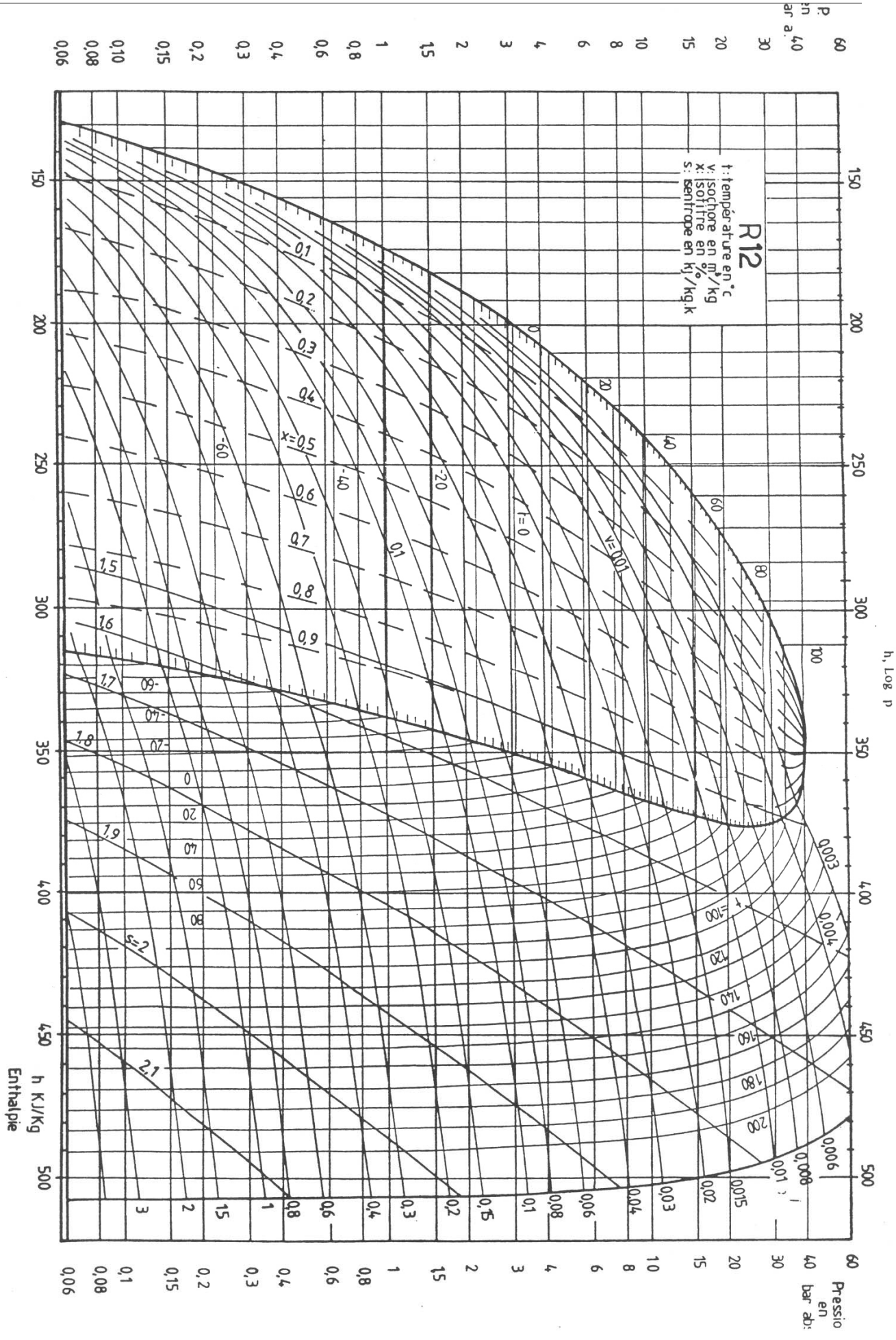
Pour les valeurs relevées, calculer :

☞ L'efficacité **maximale** d'une pompe à chaleur réversible fonctionnant entre deux sources aux températures θ_C et θ_F des deux réservoirs d'eau.

☞ L'efficacité d'une pompe à chaleur qui convertit en chaleur toute l'énergie apportée par le compresseur (l'échange thermique avec la source chaude est parfait) est donné par :

$$\eta = \frac{h_2 - h_4}{h_2 - h_1}$$

- L'efficacité réelle de la pompe étudiée (voir § 4).


R12
t: température en °c
v: isochore en m³/kg
x: isotitre en %
s: sentrope en kj/kg.k
h KJ/Kg
Enthalpie
Pression en bar abs
h, Log p

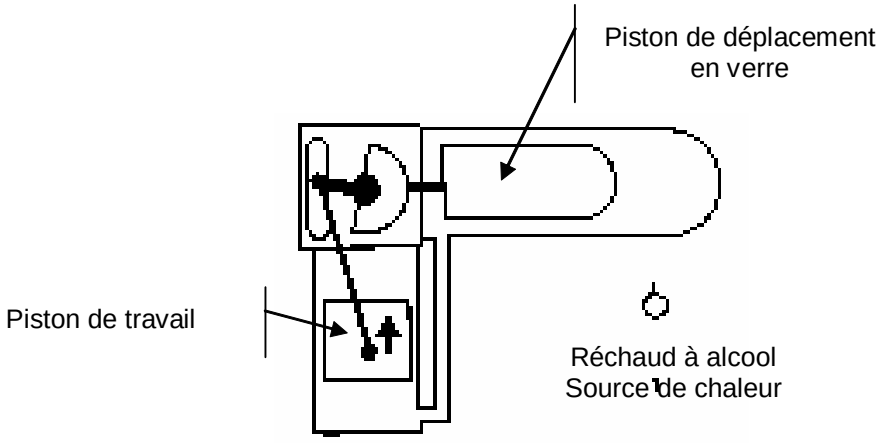
TP N°16

Étude du moteur de Stirling[8]

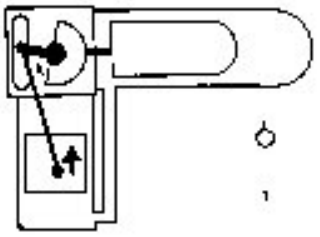
[8] Ce travail est le fruit d'un travail collectif. Tous mes remerciements à Madame Baillet pour m'avoir fourni une grande part des pages qui suivent…

MOTEUR DE STIRLING

Ce moteur a été inventé en 1816 et a fonctionné pour la première fois en 1818. Son avantage réside dans sa structure fermée et son fonctionnement à combustion externe où tous les combustibles peuvent être utilisés. Dans ce moteur, le piston de travail comprime l'air et le piston de déplacement permet de déplacer le gaz à l'intérieur du cylindre.



Le but de la manipulation est de déterminer le rendement de ce moteur.



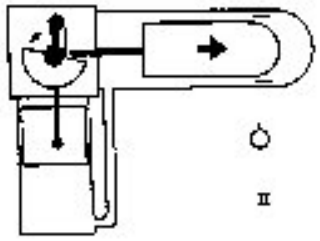
1. Description du cycle

Le cycle se décompose en 4 étapes :

I - Détente isotherme à la température T_1

$(p_1, V_1, T_1) \rightarrow (p_2, V_2, T_1)$

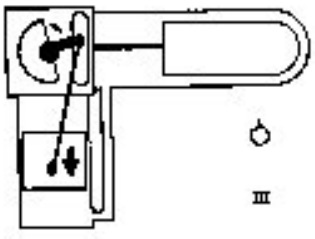
L'air se dilate sous l'effet de la chaleur reçue par la source chaude et repousse le piston de travail vers la haut, alors que le piston de déplacement reste immobile.



II - Refroidissement isochore au volume V_2

$(p_2, V_2, T_1) \rightarrow (p_3, V_2, T_2)$

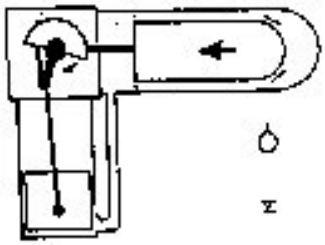
Le piston de déplacement chasse l'air de la zone située au-dessus de la flamme. L'air se refroidit de manière isochore.



III – Compression isotherme à la température T_2

$(p_3, V_2, T_2) \rightarrow (p_4, V_1, T_2)$

L'air est comprimé par le piston de travail de façon isotherme car le piston de déplacement reste immobile.



IV – Échauffement isochore au volume V_1

$(p_4, V_1, T_2) \rightarrow (p_1, V_1, T_1)$

Le piston de déplacement déplace l'air vers la zone située au dessus de la source de chaleur, alors que le piston de travail reste immobile.

2. Étude pratique

♦Préparation de l'acquisition des données

a- La source de chaleur est un réchaud à alcool :
Pouvoir calorifique de l'alcool : $K = 25\ kJ.g^{-1}$
La quantité d'alcool brûlé au cours de l'expérience est déterminée en pesant le réchaud avant et après l'expérience et en ayant pris soin de noter la durée totale de combustion (environ 15 minutes).
- ☞ Remplir le réservoir du réchaud et vérifier que la longueur de la partie émergée de la mèche ne dépasse pas de plus de1 mm.
- ☞ Peser le réchaud, mais ne pas l'allumer tout de suite.

b- Les **températures** dans les parties chaude (T_1) et froide (T_2) du cylindre de détente sont déterminées à l'aide de deux thermocouples NiCr-Ni reliés à l'appareil de mesure PVNT (mesure de la pression p, du volume V, de la vitesse de rotation N du moteur et des températures). À la mise sous tension, l'appareil affiche « CAL ».
- ☞ Les deux sondes étant à la même température, appuyez sur la touche « ΔT ». L'appareil affiche alors « ot ».
- ☞ Amener le piston de travail à sa position la plus basse, puis appuyez sur la touche « calibrer V ».

c- Le **volume** V du gaz peut varier de 32 cm^3 à 44 cm^3.
Le capteur de volume est relié à la voie EA1 de l'interface.

***Voie* 1 :** EA1 calibre : ± 5V
Nom : V Unité : cm^3 Commentaire : volume
Étalonnage manuel :
$U = 0 \rightarrow V = 32$
$U = 5 \rightarrow V = 44$

d- Le capteur de pression mesure la différence de pression Δp par rapport à la pression atmosphérique p_a.
Ce capteur est relié à la voie EA0 de l'interface.

Voie 2 : EA0 calibre : ± 5V
Nom : p Unité : Pa Commentaire : pression
Étalonnage manuel :
$U = 0 \rightarrow p = +70\ 000$
$U = 5 \rightarrow V = +219\ 000$

Mode de fonctionnement : Temporel, ***Abscisse :*** V
Balayage : Durée : ≈ 250 ms avec ≈192 points de mesure

♦ Détermination du nombre n de moles de gaz contenu dans le cylindre.

- ☞ Le réchaud à alcool étant éteint, relever le volume V, la pression p et la température T du gaz. En appliquant la loi des gaz parfaits, en déduire n ($\approx 1{,}3.10^{-3}$ mol).

♦ Acquisition des données :

- ☞ Allumer le réchaud et noter l'heure.
- ☞ Quand la température T_1 atteint environ 90°C, lancer le moteur en tournant la roue en plexiglas dans le sens des aiguilles d'une montre. La vitesse doit être comprise entre 500 et 1000 tours par minute.
- ☞ Faire quelques acquisitions enregistrées sur les pages différentes du même fichier Reg-Win, en choisissant des vitesses de rotation différentes.

  A chaque enregistrement noter comme paramètres expérimentaux :
  $T_1 = \ldots$ $T_2 = \ldots$ $N = \ldots$ (vitesse de rotation du moteur)
- ☞ Éteindre le réchaud au bout de 15 minutes environ et noter l'heure et vous le repeserez pour connaître la consommation d'alcool.

☞ Déduire la chaleur libérée par le réchaud par unité de temps.

3. Exploitation des résultats

Sauvez les acquisitions réalisées.

3.1. Visualisation du cycle de Clapeyron

☞ Observer $p = f(V)$.
☞ Décrire la forme du cycle obtenu.

3.2. Superposition des isothermes théoriques

Pour comparer avec le cycle théorique, vous allez superposer les deux isothermes théoriques.

☞ Créer les nouvelles Grandeurs Calculées :
$p_1 = nRT_1 / V$ isotherme théorique à la température T_1(en K)
$p_2 = nRT_2 / V$ isotherme théorique à la température T_2

NB : la quantité de matière ni et la constante des gaz parfaits R peuvent être considérée comme des paramètres expérimentaux de même valeur pour chaque page. Il convient donc de créer ces paramètres pour manipuler des expressions littérales.

☞ Imprimer ce graphe et rejoindre les isothermes pour figurer les isochores : c'est le cycle théorique.
☞ Que constatez-vous ?
☞ Pourquoi ?

3.3. Le cycle théorique

☞ En prenant les valeurs expérimentales de volume et de température, déterminer, au cours de chaque étape, les quantités de chaleur Q_i et les travaux W_i échangés par le gaz supposé parfait avec le milieu extérieur ($C_{v,m}$ = 5R/2)
☞ En déduire le rendement théorique de ce cycle : $\eta = W_{total} / Q$ échangée avec la source chaude

3.4. Détermination du travail effectué au cours du cycle réel

☞ Créer la nouvelle Grandeur, Intégrale :
W unité : J
W représente le travail effectué par le moteur pendant le temps de l'acquisition :
$W = -\int p \, \mathrm{d}V$

☞ Visualiser : $W = f(t)$.
☞ A partir de ces graphes, évaluer le travail W effectué par le moteur au cours d'un cycle.
☞ Quelle a été votre façon de procéder ?
☞ Déterminer graphiquement la durée d'un cycle.
☞ Vérifier votre résultat par la connaissance du nombre de tours N effectuées par minute.
☞ Comparer la valeur expérimentale à la valeur évaluée à l'aide du cycle théorique.

☞ Déterminer la puissance P du moteur.

3.5. Détermination du rendement

☞ Calculer la quantité de chaleur Q fournie par la source chaude pendant la durée d'un cycle.

$$\eta = \frac{\text{Travail total } W_{\text{total}} \text{ fourni pendant un cycle}}{\text{Quantité de chaleur } Q_c \text{ fournie par le réchaud pendant un cycle}}$$

☞ Comparer ce rendement au rendement théorique du cycle.

- Comparer votre résultat expérimental à celui d'une machine fonctionnant suivant un cycle idéal réversible de type Carnot : $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$
- Justifier les différences.

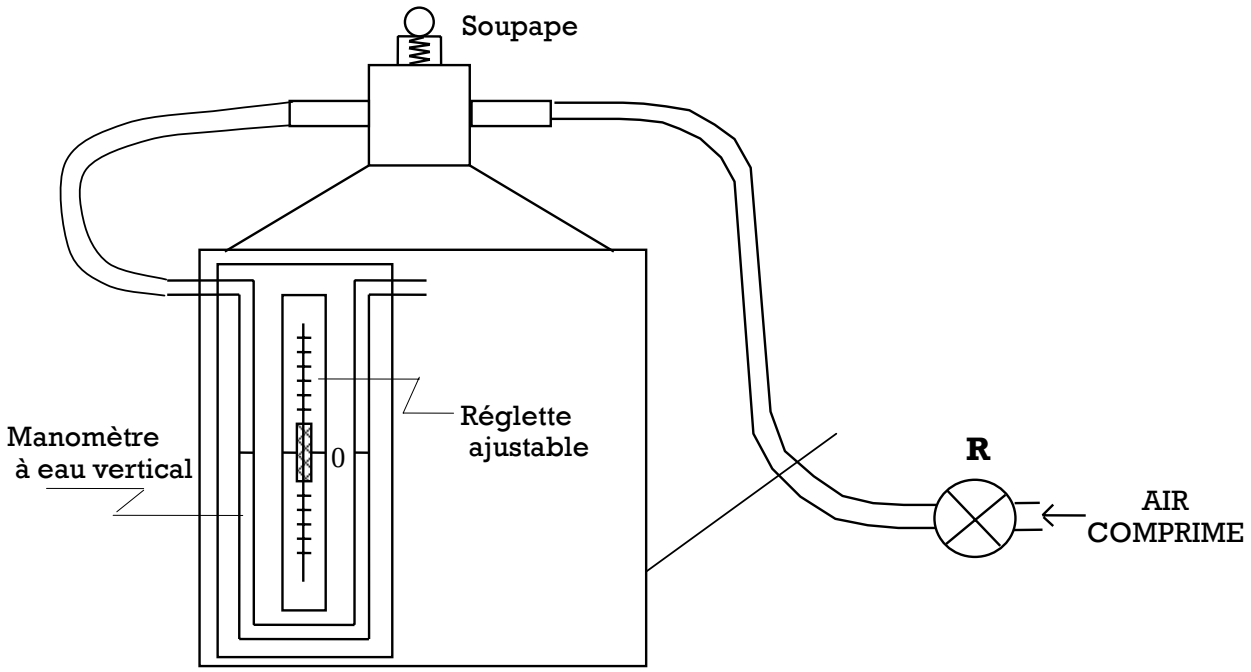
TP N°17

Mesure du rapport $\gamma = C_p/C_v$ de l'air par la méthode de Clément & Desormes

Mesure du rapport $\gamma = C_P/C_V$ de l'air par la méthode de Clément & Desormes

Cette expérience a pour objet de mesurer le rapport c_p / c_v = γ de l'air.

1. Schéma du montage



2. Principe de la mesure

Un récipient de contenance $V \approx 25$ L, rempli d'air à la pression atmosphérique p_a est muni d'une soupape, d'un manomètre à eau et d'un tuyau relié à l'air comprimé de la salle et permettant d'augmenter la pression.

La soupape étant fermée, on comprime légèrement l'air de la bouteille en ouvrant doucement le robinet d'air comprimé : on relève alors une dénivellation H à la température ambiante. On soulève la soupape pendant une faible durée et on la repositionne.

On constate que la dénivellation s'annule d'abord car une partie du gaz s'échappe ; mais on admet que la partie qui reste dans la bouteille subit une détente. Au bout de quelques minutes, la dénivellation prend une nouvelle valeur h.

3. Mode opératoire détaillé et étude qualitative

A l'état initial, l'air contenu dans la bouteille occupe un volume V_i, à la pression atmosphérique p_a et à la température ambiante T_a.

3.1. Première transformation (① → ②)

☞ Introduire, **le plus lentement possible**, de l'air comprimé dans la bouteille jusqu'à obtenir une surpression ::

$$p = \rho \times g \times H \text{ correspondant à environ 15 à 19 cm d'eau.}$$

☞ Veiller à ce que la pression reste stable : fuite éventuelle au niveau de la soupape. Dans le cas contraire, appuyer sur la soupape de façon à la repositionner correctement ; la fuite doit cesser.

☞ Relever la dénivellation totale *H*.

Questions en cours de route ::

Q1 : Quelle est alors la pression dans la bouteille ?

R1 :

Q2 : L'air initialement contenu dans la bouteille occupe désormais un volume V_2. Comparer qualitativement ce volume V_2 au volume initial V_i.

R2 :

Q3 : Comment peut-on qualifier la transformation ① → ② ?

R3 :

Q4 : Que se passe-t-il quand on introduit l'air rapidement ? Quelle interprétation proposez-vous ?

R4 :

Q5 : Si l'on note cette transformation ① → ❶ → ②, comment peut-on qualifier les deux transformations qui s'opèrent ? Indications : Si la première, ① → ❶, est provoquée, la seconde, ❶ → ②, est spontanée.

R5 :

*Pour éviter cela, il faut donc comprimer **lentement** l'air au cours de la transformation ① → ②.*

3.2. Seconde (② → ③) et troisième (③ → ④) transformations

☞ Soulever brièvement la soupape **S** de façon à laisser échapper le surplus d'air introduit.

La pression retombe rapidement à la pression atmosphérique (0 de l'échelle) puis remonte lentement pour atteindre un niveau stable repérable par la dénivellation *h*.

☞ Relever la dénivellation *h*.

Questions en cours de route (suite) :

Q6 : Comment peut-on qualifier la transformation (② → ③) ?

R6 :

Q7 : Comment peut-on qualifier la transformation (③ → ④) ?

R7 :

*Q8 :*Représenter dans un diagramme de Clapeyron :

- ▫ en traits pleins la séquence des trois transformations ①→②→③→④ ;
- ▫ en pointillés, la transformation à éviter : ①→❶→②.

4. Exploitation des données

La théorie (voir en annexe) permet de montrer que : $\gamma = \dfrac{H}{H-h}$

☞ Effectuer la manipulation précédente de façon à recueillir une dizaine de couples (*H*, *h*).

H (mm)									
h (mm)									
γ									

☞ Effectuer un **traitement statistique sur** γ afin d'exprimer convenablement la valeur obtenue. C'est l'occasion de **combiner** l'incertitude de typa A élargie par le coefficient de **Student** et l'incertitude de type B due aux résolutions des appareils.

☞ Comparer votre résultat à la valeur théoriquement admise pour un gaz parfait diatomique : $\gamma_{th} = 1{,}40$.

☞ Essayer d'expliquer la différence trouvée.

☞ A votre avis, la manipulation présente-t-elle une (ou des) erreur systématique ?

☞ La transformation ② → ③ est-elle vraiment adiabatique ?

☞ Comment pourrait-on la qualifier en réalité ?

ANNEXE 1:

DÉMONSTRATION DE LA RELATION UTILISÉE DANS LA MÉTHODE DE CLÉMENT & DESORMES

Au cours de la détente adiabatique ② → ③ le gaz voit :

sa température diminuer de dT : elle passe de T_a à T

sa pression diminue de dp *:* elle passe de $p_a + \rho g H$ à p_a.

En fonction de la pression et de la température, la loi de Laplace s'exprime par :

$$p^{1-\gamma} T^{\gamma} = \text{cte}$$

en prenant la différentielle logarithmique :

$$(1-\gamma)\frac{\mathrm{d}p}{p} + \gamma\frac{\mathrm{d}T}{T} = 0 \qquad \text{où} \qquad \mathrm{d}p < 0 \text{ et } \mathrm{d}T < 0$$

Au cours de la compression isochore ③ → ① :

la température du gaz augmente de dT' en repassant de T à T_a.

la pression augmente de dp' en passant de p_a à $p_a + \rho g h$

On a donc : $\frac{p}{T} = cte$ d'où $\frac{\mathrm{d}p'}{p} = \frac{\mathrm{d}T'}{T}$

Comme dT = -dT' :

$$(1-\gamma)\frac{\mathrm{d}p}{p} = \gamma\frac{\mathrm{d}p'}{p} \quad \Rightarrow \quad \frac{1-\gamma}{\gamma} = \frac{\mathrm{d}p'}{\mathrm{d}p}$$

Or

$$\mathrm{d}p' = \rho \cdot g \cdot \mathrm{d}h \quad \text{et} \quad \mathrm{d}p = \rho \cdot g \cdot \mathrm{d}H$$

$$\Rightarrow \quad \frac{1-\gamma}{\gamma} = \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}H} = \frac{h}{H}$$

Soit finalement :

$$\boxed{\gamma = \frac{H}{H-h}}$$

TP N°18

Mesure de γ par une méthode acoustique

MESURE DE γ PAR UNE MÉTHODE ACOUSTIQUE

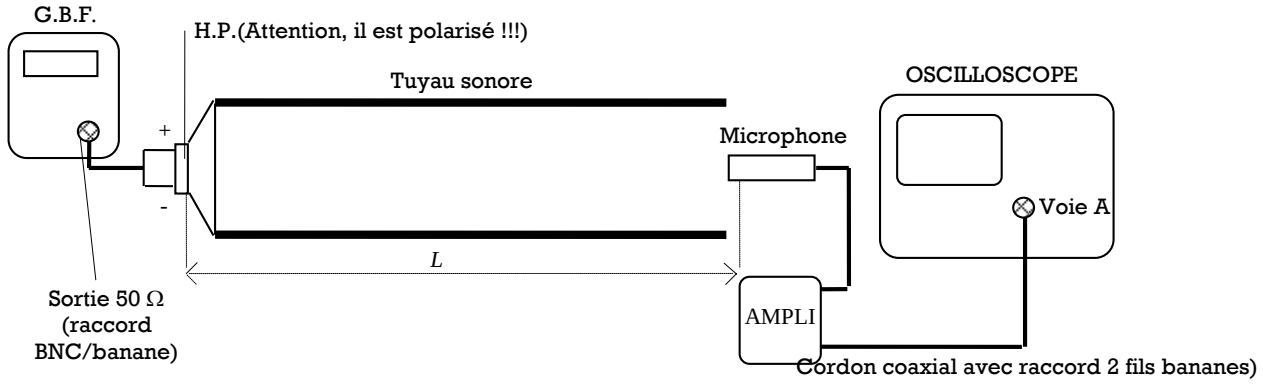
1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

1.1. Matériel

On dispose :

- d'un générateur basses fréquences muni d'un fréquencemètre (G.B.F.),
- d'un haut-parleur de diamètre 50 mm (H.P.),
- d'un tuyau sonore de longueur L = 1,04 mètre,
- d'un microphone et de son module d'amplification,
- d'un oscilloscope.

1.2. Schéma du montage



1.3. Mise en place du haut-parleur et du microphone

☞ Caler le haut-parleur au fond du raccord et placer le microphone au ras de la sortie du tube (on pourra s'aider d'une cale en papier).

Dans ces conditions, la longueur L entre le haut-parleur et le microphone vaut : L = 1,04 m.

Cette longueur devra être constante pendant toutes les mesures.

1.4. Principe de la manipulation

On cherche à mesurer la vitesse du son dans l'air.

Pour ce faire, on fait varier la fréquence émise par le haut-parleur entre une fréquence ≈ 1 kHz à ≈ 2 kHz et l'on relève les fréquences où la tension recueillie par le microphone passe par un maximum.

Le tuyau sonore étant le siège **d'ondes stationnaires**, ces maxima correspondent à des maxima de pression d'air sur le microphone.

Comme au niveau du haut-parleur, l'amplitude sonore est aussi maximale, la longueur du tuyau contient un nombre entier de demi-longueurs d'ondes.

Si k est un nombre entier, λ la longueur d'onde, v la vitesse du son, f la fréquence et i le $i^{ème}$ maximum :

$$L = k_i \cdot \frac{\lambda_i}{2} = k_i \cdot \frac{v}{2 \cdot f_i} \text{ car } \qquad \lambda_i = \frac{v}{f_i}$$

d'où :

$$L = k_i \cdot \frac{v}{2 \cdot f_i} = k_{i-1} \cdot \frac{v}{2 \cdot f_{i-1}}$$

Comme entre deux maxima successifs $k_i - k_{i-1} = 1$, on en déduit :

$$v = 2 \cdot L(f_i - f_{i-1})$$

D'autre part, une onde sonore est constituée d'une succession de compressions et de détentes adiabatiques de sorte que l'on peut démontrer que dans l'hypothèse des gaz parfaits :

$$\boxed{v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}}$$

on prendra : R = 8,3145 J/K.mol et M = 29,00 g/mol

1.5. Mesures et résultats

- ☞ Relever la température ambiante : $T_a \pm \Delta T_a$
- ☞ Après avoir effectué plusieurs séries de mesures compléter les tableaux ci-dessous :

Maxima		1	2	3	4	5	6	7	8
Fréquences (Hz)	série 1								
	série 2								
	série 3								
	série 4								
	série 5								
	série 6								
	Moyenne								

Vitesse moyenne (m/s)							
entre les maxima	2 et 1	3 et 2	4 et 3	5 et 4	6 et 5	7 et 6	8 et 7

- ☞ Calculer la vitesse moyenne (moyenne des moyennes) : v = ...
- ☞ Calculer l'écart-type des moyennes : σ = ...
- ☞ En déduire l'incertitude : u(v) = ...
- ☞ Enfin, après avoir rappelé son expression littérale, calculer le coefficient γ :

$$\gamma =$$

- ☞ Combien de chiffres significatifs peut-on attribuer à ce résultat ?
- ☞ Justifier.

$$\boxed{\gamma = \quad \pm}$$

Remarque : C'est avec profit que l'on peut, ici, utiliser un tableur.

TP N°19

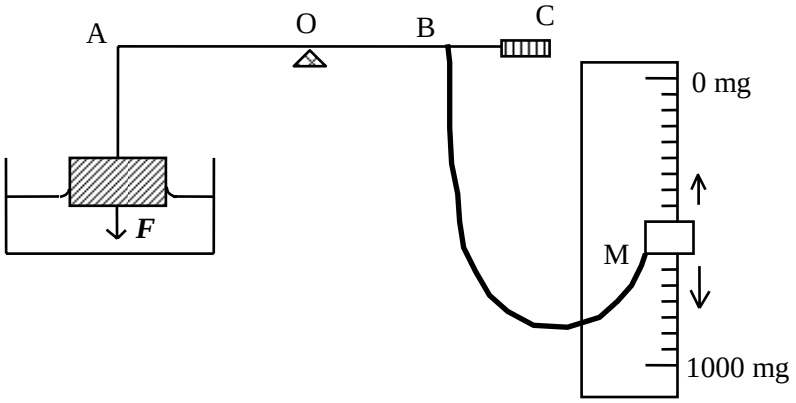
Mesures de tensions superficielles

MESURES DE TENSIONS SUPERFICIELLES

1. Utilisation d'une balance de tension superficielle : méthode d'arrachement

1.1. Principe

Schéma de principe de l'appareil :



Une chaîne est assujettie en B au fléau de la balance et en M à un curseur mobile le long d'une réglette.

A la limite de l'arrachement de la lame en contact avec la surface du liquide, on compense la force **F** de tension superficielle en descendant le curseur le long de la règle. Cela permet d'appliquer en B un poids convenable de chaîne.

La balance ayant été étalonnée par le constructeur, la réglette est directement graduée en milligrammes.

Si l'on appelle m la masse lue à l'équilibre qui précède juste l'arrachement, on peut poser :

$F = m\,g$ et $F = \gamma\,L$ où L est la longueur totale de la lame.

On en déduit :

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{L} \qquad (g = 9{,}81 \text{ N/kg})$$

On dispose de deux lames différentes :

- une lame rectangulaire,
- un contour cylindrique.

1.2. Technique de mesure

- Mesurer au pied à coulisse les cotes de la lame rectangulaire et du contour cylindrique. En déduire les longueurs totales L_r et L_c.
- Nettoyer soigneusement les "lames" à l'alcool et les sécher.
- Pour quelle raison faut-il éviter de les toucher avec les doigts ?
- Suspendre la lame (ou le contour cylindrique) en A.
- S'assurer ensuite que le curseur M est au zéro.
- Amener la balance à l'équilibre en agissant sur le contrepoids C.

☞ Monter doucement le cristallisoir contenant le liquide jusqu'à ce que la surface libre entre en contact avec la lame.

☞ Si le ménisque n'est pas régulier, recommencer l'opération de nettoyage de la "lame".

☞ Agir sur le curseur M pour ramener la balance à l'équilibre, tout en manœuvrant le cristallisoir : au moment de la lecture de la masse m, *la lame doit être à la limite de l'arrachement*.

☞ Bien nettoyer et sécher la lame avant chaque mesure.

1.3. Étude de la tension superficielle de l'eau

On mesurera :

- la tension superficielle de l'eau distillée du laboratoire,
- la tension superficielle de l'eau de ville,
- la tension superficielle de l'eau sur laquelle on a saupoudré de la poussière,
- la tension superficielle de l'eau additionnée de détergent liquide,
- la tension superficielle de l'acétone,
- la tension superficielle de l'alcool.

Afin d'obtenir un résultat suffisamment fiable, on est amené à répéter plusieurs fois chaque mesure (au moins 5 fois) et donc d'effectuer un traitement statistique des résultats.

☞ Pour l'étude de l'eau distillée du laboratoire, utiliser successivement les deux types de lames ; mais on se contentera d'une seule lame pour les autres mesures.

☞ Évaluer les incertitudes u(m) sur la masse m afin d'exprimer le résultat avec un nombre de chiffres significatifs convenable.

☞ Veiller à ce que ce ne soit pas les mesures sur L qui limitent la précision sur la détermination des tensions superficielles.

Rassembler les résultats dans un tableau :

	m (mg)	m_{moyen} (mg)	u(m) (mg)	$\frac{u(m)}{m}$	γ (N/m)	$\frac{u(\gamma)}{\gamma}$
Eau pure (lame) (cylindre)						
Eau de ville						
Eau + poussière						
Eau + détergent						
Acétone						
Alcool						

☞ Interpréter les résultats.

TP N°20

Étude d'un tensioactif

ÉTUDE D'UN TENSIOACTIF
UTILISATION DU TENSIOMETRE LAUDA TD 1

1. Généralités sur l'appareil utilisé

Le tensiomètre est constitué de deux unités :

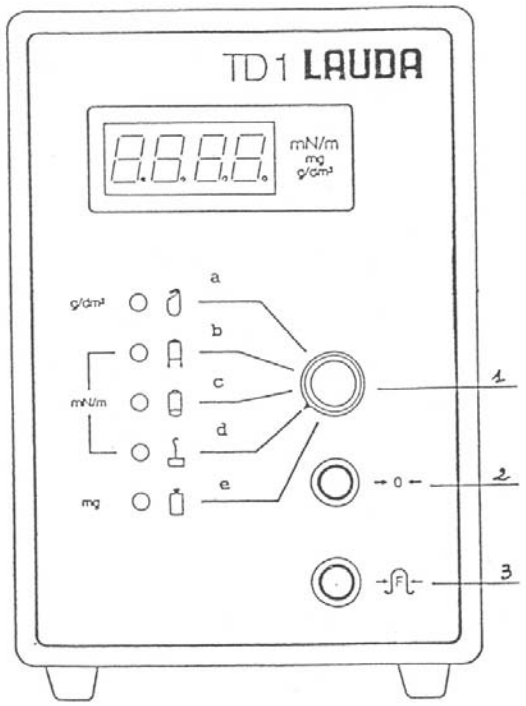
- un sous-ensemble mécanique
- un sous-ensemble électronique

Il permet de mesurer des tensions superficielles, interfaciales mais aussi des densités et de faibles masses.

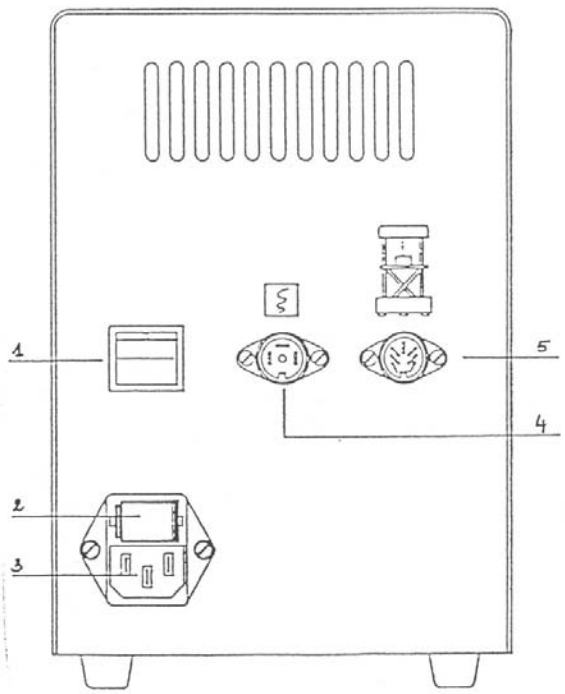
Nous nous contenterons de l'utiliser comme tensiomètre.

Dans le cas des mesures de tensions superficielles, il y a la possibilité d'utiliser trois corps de mesures différents. Là encore, nous limiterons notre choix à l'utilisation de la **lame de platine/iridium de Wilhemy**.

2. Vues de l'appareil



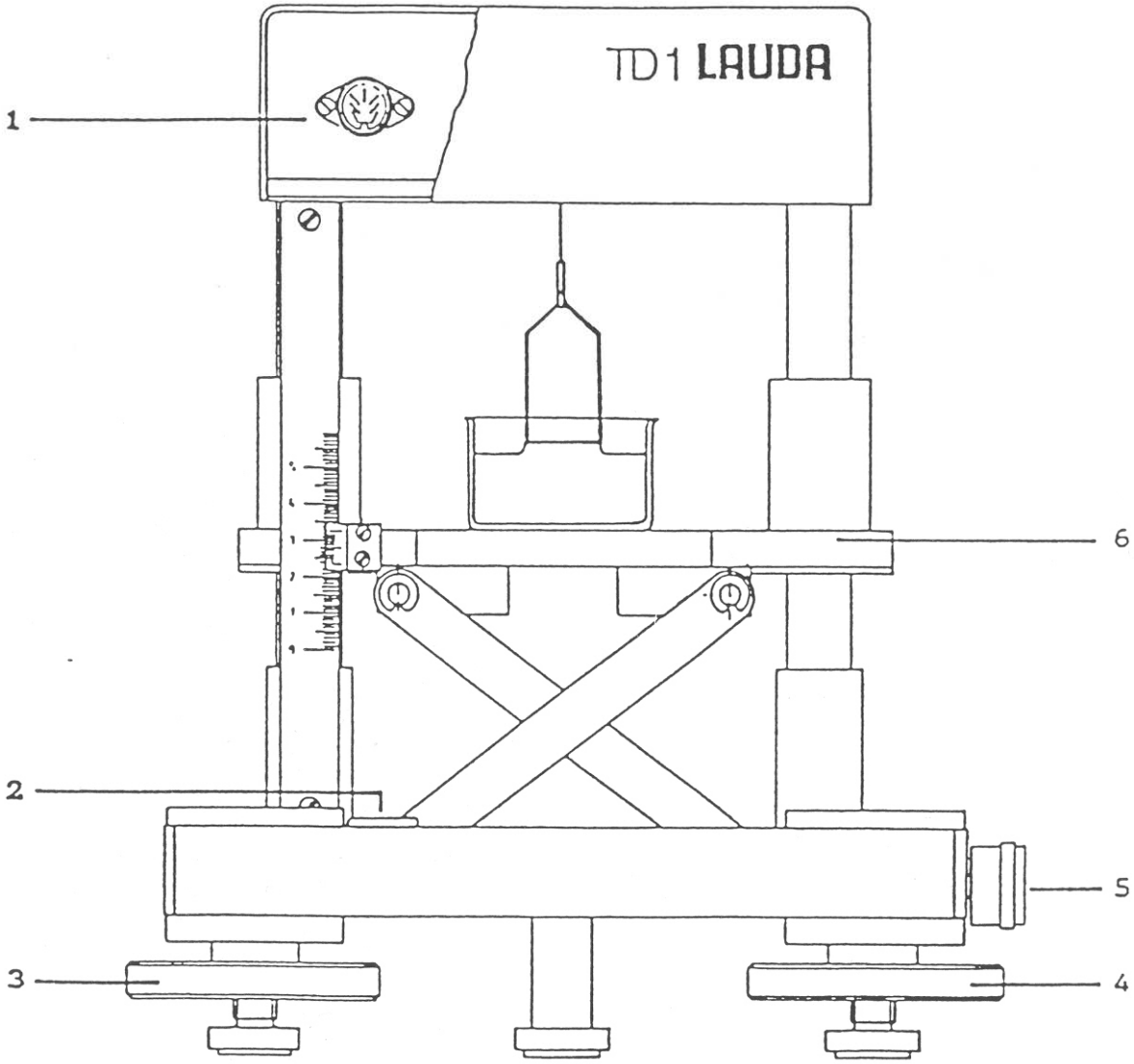
1 TYPE DE MESURE
2 REGLAGE DE ZERO
3 ETALONNAGE



1 INTERRUPTEUR
2 FUSIBLE (0,1A)
3 ALIMENTATION SECTEUR
4 SORTIE ENREGISTREUR
5 RACCORDEMENT BALANCE

Vue avant de la partie mécanique

Vue avant de la partie mécanique



1 RACCORDEMENT BOITIER

2 NIVEAU

3 ET 4 PIEDS REGLABLES

5 BOUTON DE COMMANDE

6 PLATEFORME SUPPORT RECIPIENT

3. Principe de l'appareil

La mesure de la tension superficielle avec la lame correspond à la **mesure de la force verticale qu'exerce la surface du liquide sur la corps de mesure**.

Le TD 1 dispose à cet effet d'un mécanisme actionné à la main qui permet au liquide mesuré de se déplacer vers le haut ou vers le bas sans vibration. La force maximale est obtenue par **un déplacement lent de la plate-forme mobile** après que le contact ait été établi avec la surface.

Afin d'effectuer un mesure sans déplacement, la force qui est transmise par le corps de mesure au support est compensée de façon électromagnétique. Le courant électrique nécessaire est directement proportionnel à la force.

La valeur obtenue par transformation intensité / tension est indiquée, après conversion analogique numérique, sur l'affichage digital, de manière à correspondre à la force réelle.

La détermination de la position du support de mesure, qui est nécessaire pour réaliser une mesure sans déplacement, est effectuée par un capteur optoélectronique.

4. Précautions de mise en service de l'appareil

- ☞ Installer l'appareil sur un **plan stable et sans vibration** et régler l'horizontalité à l'aide du niveau à bulle.
- ☞ Le tube en Plexiglas protégeant le système de mesure et le crochet est coincé entre la table et le boîtier du capteur. Il faut **le débloquer en abaissant la table et le retirer avec précaution**. Pendant cette opération, il faut **faire particulièrement attention au fil de soie très fin** et appuyer le moins possible sur le système de mesure.
- ☞ Vérifier que l'interrupteur d'alimentation est sur arrêt avant de brancher l'appareil sur le secteur.

5. Mesure de la tension superficielle d'un tensioactif

5.1. Préparation de la mesure

Pour réaliser ce type de mesures, il faut d'abord effectuer les opérations suivantes :

- ☞ Accrocher la lame (Wilhemy Platte EZ 142) au crochet du système de mesure, sans contact avec le liquide à mesurer. **La manipuler avec d'extrêmes précautions en l'attrapant délicatement par sa tige (près de 500 € !)**.

NE JAMAIS TOUCHER LA PLAQUE AVEC LES DOIGTS !

- ☞ Mettre le TD 1 sous tension avec l'interrupteur principal.
- ☞ Positionner le sélecteur de mesure sur le symbole représentant la lame (**d**)
- ☞ Régler la valeur affichée sur « **00.0** » à l'aide du potentiomètre de réglage de zéro.
- ☞ En plus de la lame, suspendre la masse de 100 mg au crochet.
- ☞ Afficher à l'écran la valeur **24.5(3)** [mN/m] à l'aide du potentiomètre d'étalonnage.
- ☞ Enlever la masse et l'affichage doit à nouveau indiquer « 00.0 ». Si ce n'est pas le cas recommencer les opérations précédentes.

5.2. Mesure statique

Une mesure avec la lame s'effectue comme suit :

- ☞ Pour chaque mesure, prendre soin **d'extrêmement** bien nettoyer le cristallisoir à l'eau.
- ☞ L'essuyer délicatement au papier Joseph.
- ☞ Abaisser le plus possible la plate-forme et y poser le cristallisoir après l'avoir rempli avec le liquide à étudier.
- ☞ Relever lentement la plate-forme jusqu'à ce que la lame entre en contact avec la surface du liquide.
- ☞ Continuer à immerger la lame pour la mouiller totalement.
- ☞ Remonter lentement la lame : la valeur affichée augmente.
- ☞ A l'instant où le contact de la lame et de la surface se rompt la valeur maximale de la tension superficielle (en mN/m) s'affiche. C'est cette valeur qu'il faut prendre en compte.
- ☞ **Refaire plusieurs fois l'opération pour vérifier la concordance des mesures.**

6. Travail à effectuer

6.1. But du travail

Nous étudions le comportement du sodium dodécyle sulfate ($C_{12}H_{25}NaSO_4$) en fonction de sa concentration dans l'eau.
Il s'agit d'un tensioactif communément utilisé dans l'industrie des détergents et en génie génétique pour dénaturer des protéines.

Vous êtes chargé de déterminer la valeur de la concentration micellaire critique (CMC). C'est à dire la concentration à partir de laquelle la surface est saturée en tensioactif et à partir de laquelle la formation de micelles au sein de la solution débute vraiment.

6.2. Méthodologie expérimentale : corrélation de deux méthodes.

- ☞ Vous disposez d'une solution mère 0,1 mol/L, d'une burette de 25 mL, de béchers, etc.
- ☞ Cela doit vous permettre de balayer une large étendue de concentrations [0,1 à 10^{-5} mol/L] (au moins 10 dilutions).
- ☞ Pour chaque dilution, mesurer ***la tension superficielle*** avec la balance Lauda **et** la ***conductivité*** avec le conductimètre Tacussel CDM 210 (cf. T.P. 5 p.20 et sq.).
- ☞ Dresser un tableau des résultats.
- ☞ Tracer les courbes de la tension superficielle et de la conductivité en fonction de la concentration.

6.3. Interprétation des mesures

- ☞ Commenter chacune des courbes obtenues.
- ☞ Utilisez ces courbes pour obtenir la valeur de la CMC.
- ☞ Tenter ***une interprétation au niveau moléculaire*** qui explique la forme des courbes.

T.P N°21

Rapidité – Temps de réponse d'un capteur de température

RAPIDITE – TEMPS DE REPONSE D'UN CAPTEUR DE TEMPERATURE

1. Travail expérimental à réaliser

☞ Au regard de la présentation qui suit au paragraphe 2, effectuer, avec les capteurs de température mis à votre disposition, des mesures qui permettent de définir les caractéristiques du capteur en ce qui concerne sa rapidité.

Le plan de compte rendu pourra être le suivant :

- *Protocoles expérimentaux proposés.*
- *Manipulations effectuées.*
- *Exploitation des données recueillies.*
- *Conclusion(s)*

Contrairement à tous les TP précédents, celui-ci cherche à faire appel à votre autonomie. Mettez la en valeur.

La partie théorique qui suit doit vous permettre de mener convenablement l'étude expérimentale proposée. Une lecture approfondie s'impose avant tout travail expérimental !

2. Notion de temps de réponse

Parmi les caractéristiques d'un capteur (étendue de mesure, sensibilité, finesse…) le **temps de réponse** est un facteur à prendre en grande considération dès que l'on veut suivre l'évolution temporelle d'un phénomène.

Le temps de réponse sert à quantifier la **rapidité** du capteur ; c'est à dire à apprécier son aptitude à suivre les variations de la grandeur captée d'entrée de la chaîne de mesure (notée *e* par la suite).

Si le temps de réponse était nul, le capteur serait capable de suivre instantanément les variations de la grandeur captée. Ce n'est jamais le cas ! Il s'ensuit un régime transitoire qu'il convient de connaître.

Pour cela, on impose de brusques variations de la grandeur captée que l'on appelle des **échelons**. Ceux-ci peuvent être **montants** (*e* passe de e_{min} à e_{max} en un temps le plus court possible) ou **descendants**.
En sortie, la réponse *s* du capteur ne s'établit que progressivement.

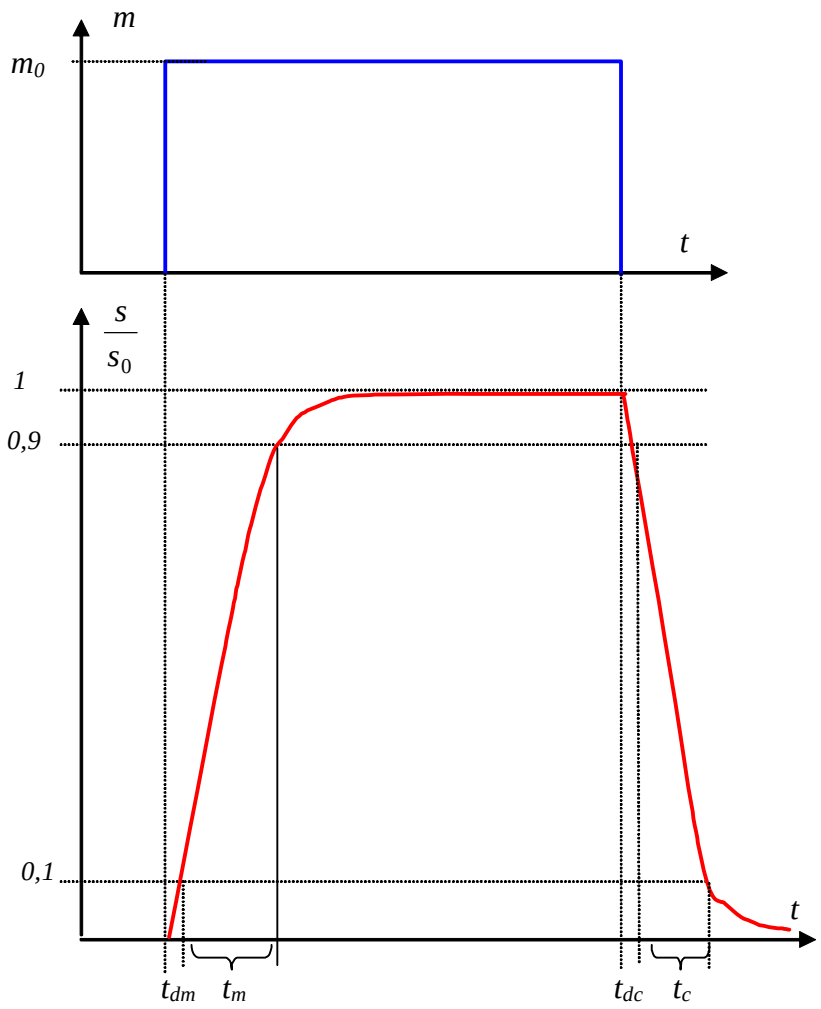


Figure 1 : Le capteur a un délai de réaction !

3. Définitions

a. Définition générale valable pour un échelon qui démarre à zéro

*Le temps de réponse est la durée qui s'écoule après une variation brusque (appelée : **échelon**) du **mesurande**[9] jusqu'à ce que la variation de la sortie du capteur ne diffère plus que de ε % de la valeur finale.*

On note le temps de réponse : $t_R(\varepsilon\%)$

Un capteur est d'autant plus rapide que son temps de réponse est plus court. La donnée de t_R caractérise la vitesse d'évolution du régime transitoire.

b. Autres définitions valables quel que soit l'échelon

Pour un échelon de grandeur captée entraînant la croissance de la grandeur de sortie *s* :

t_{dm} : **temps de retard à la montée ou délai de montée**

Temps nécessaire pour que la grandeur de sortie *s* augmente, à partir de sa valeur initiale, de 10% de sa variation totale.

t_m : **temps de montée**

[9] Le mesurande est la grandeur que l'on cherche à mesurer : dans notre cas une température.

Intervalle de temps correspondant à la croissance de *s* de 10% à 90% de sa variation totale.

Pour un échelon de grandeur captée entraînant la décroissance de la grandeur de sortie *s* :

t_{dc} : **temps de retard à la chute ou délai de chute**

Temps nécessaire pour que la grandeur de sortie *s* diminue, à partir de sa valeur initiale, de 10% de sa variation totale.

t_c : **temps de chute**

Intervalle de temps correspondant à la décroissance de *s* de 10% à 90% de sa variation totale.

4. Modélisation la réponse d'un capteur du premier ordre

Bien que les définitions puissent, dans la pratique, être suffisantes, nous vous proposons ici les modèles théoriques.

4.1. Étude théorique de la montée

Pour une grandeur d'entrée *e* défini par : $e = 0$ pour $t < 0$ et $e = e_0$ pour $t \geq 0$; l'équation différentielle du système s'écrit : $A\frac{ds}{dt} + Bs = m_0$

Sa solution est : $s = s_0\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$ où $s_0 = \frac{m_0}{B}$ valeur de *s* en régime permanent

$\tau = \frac{A}{B}$ constante de temps du système

τ est la durée au bout de laquelle $s = s_0 \cdot (1 - e^{-1}) = s_0 \cdot (1 - 0,37) = 0,63 \cdot s_0$

Le temps de réponse peut être déterminé graphiquement ou à partir de la relation :

$$e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} = \frac{\varepsilon}{100} \quad \text{soit} \quad \boxed{t_R(\varepsilon) = 2,3(2 - \log\varepsilon)\cdot\tau}$$

Remarque : la constante de temps τ est en fait égale à t_R (63%)

4.2. Étude théorique de la chute

Pour une grandeur d'entrée *e* défini par : $e = e_0$ pour $t < 0$ et $e = 0$ pour $t \geq 0$; l'équation différentielle du système s'écrit : $A\frac{ds}{dt} + Bs = 0$

Sa solution est : $\boxed{s = s_0 e^{-\frac{t}{\tau}}}$ où $s_0 = \frac{m_0}{B}$ valeur de *s* en régime permanent

$\tau = \frac{A}{B}$ constante de temps du système

τ est la durée au bout de laquelle $s = s_0 \cdot (e^{-1}) = \cdot = 0,37 s_0$

- DOCUMENT -

PROPRIETES DE L'EAU A DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES

θ (°C)	ρ (g.cm^3)	c_p (J/g K)	P_{sat} (kPa)
0	0,999 87	4,2176	0,6113
10	0,999 73	4,1921	1,2281
15	0,999 13		
20	0,998 23	4,1818	2,3388
25	0,997 07		
30	0,995 68	4,1784	4,2455
35	0,994 06		
40	0,992 25	4,1785	7,3814
45	0,990 24		
50	0,988 07	4,1806	12,344
55	0,985 72		
60	0,983 23	4,1843	19,932
65	0,980 58		
70	0,977 79	4,1895	31,176
75			
80	0,97182	4,1963	47,373
85			
90	0,96535	4,205	70,117
95			
100	0,95840	4,2159	101,325

ANNEXE 1

1. UTILISATION DE LA MÉTHODE DE STUDENT

Soient :

n le nombre de mesures effectuées ;

$\bar{x}$ la moyenne des résultats des mesures ;

$u_c(x)$ l'incertitude type combinée de la série de mesures.

L'évaluation de l'incertitude élargie au niveau de confiance spécifié en % :

$$u_{\%}(x) = t_{\%} u_c(x)$$

Le résultat de la série de mesures s'exprime alors sous la forme :

$$x = \bar{x} \pm u_{\%}(x)$$

2. TABLE DES COEFFICIENTS t DE STUDENT

(n est le nombre de mesures)

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_{95}	12,7	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26
t_{99}	63,7	9,93	5,84	4,60	4,03	3,71	3,50	3,36	3,25
n	12	14	16	18	20	30	50	100	∞
t_{95}	2,20	2,16	2,13	2,11	2,09	2,04	2,01	1,98	1,96
t_{99}	3,11	3,01	2,95	2,90	2,86	2,76	2,68	2,63	2,57
q_{99}	0,28	0,24	0,21	0,19	0,18	0,12			

Notes personnelles